

کد رهگیری پروپوال: ۱۶۸۶۳۸۱

کد رهگیری پایان نامه:

پایگاه اطلاعات علمی ایران



تجدنامه اصالت اثر

اینجانب حسین محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران دانشکده فنی و مهندسی به شماره دانشجویی ۹۷۱۳۹۷۹۰۱۰ که از پایان‌نامه خود با عنوان: محصولات پایه سیمانی حاوی سرباره فعال شده با قلیا در برابر پدیده واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها با استفاده از یک رویکرد (با استفاده از یک روش جدید) دفاع نموده‌ام، بدین وسیله متعهد می‌شوم:

- نتایج مندرج در این پایان‌نامه توسط اینجانب به دست آمده و از صحت و اصالت برخوردار است و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران اعم از پایان‌نامه، کتاب، مقاله و غیره استفاده کرده‌ام، رعایت کامل امانت را نموده، مطابق مقررات، آن‌ها را ارجاع داده و در فهرست منابع و مآخذ اقدام به ذکر آنها نموده‌ام.
- تمام یا بخشی از این پایان‌نامه تاکنون توسط اینجانب یا فرد دیگری برای دریافت هرگونه مدرک تحصیلی (پایین تر، همسطح یا بالاتر) در هیچ کجا ارائه نگردیده است.
- کلیه حقوق مادی و معنوی حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه بوعلی سینا بوده و هرگونه بهره‌مندی اختراع و یا نشر دستاوردهای حاصل از این پژوهش (و یا به صورت ترکیبی با اطلاعات دیگر) اعم از چاپ کتاب، مقاله، ثبت و غیره (چه در زمان دانشجویی و یا پس از فراغت از تحصیل) با هماهنگی استاد (ان) راهنما و مشاور و به نام "دانشگاه بوعلی سینا" و یا "Bu-Ali Sina University" صورت گیرد.
- در تمامی مقالات حاصل از این پایان‌نامه، برای چاپ و ارائه در مجلات داخلی و خارجی، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها آدرس‌های ذیل را درج نمایم:

....., *Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.*

.....، گروه، دانشکده، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

مقالات خارجی

مقالات داخلی

- حقوق مادی و معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی این پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند را در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت نموده و در تمامی آن‌ها نام استاد (ان) راهنما و نشانی الکترونیکی دانشگاهی آنان را قید نمایم.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی داشته یا از آن‌ها استفاده کرده‌ام، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی پژوهش را رعایت نموده‌ام.

نام و نام خانوادگی دانشجو: حسین محمدی

تاریخ

امضاء



دانشگاه گیلان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه آموزشی مهندسی عمران

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم جهت اخذ
درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش مدیریت ساخت

عنوان:

محصولات پایه سیمانی حاوی سرباره فعال شده با قلیا در برابر پدیده
واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها با استفاده از یک رویکرد (با استفاده از
یک روش جدید)

استاد راهنما:

دکتر ابراهیم قیاسوند

نگارش:

حسین محمدی

۱۵ بهمن ۱۴۰۰



دانشگاه بوعلی سینا
مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان:

محصولات پایه سیمانی حاوی سرباره فعال شده با قلیا در برابر پدیده واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها با استفاده از یک رویکرد (با استفاده از یک روش جدید)

نام نویسنده: حسین محمدی

شماره دانشجویی: ۹۷۱۳۹۷۹۰۱۰

نام استاد/اساتید راهنما: دکتر ابراهیم قیاسوند

نام استاد/اساتید مشاور: -

دانشکده: فنی و مهندسی

گروه آموزشی: مهندسی عمران

رشته تحصیلی: مهندسی عمران

گرایش تحصیلی: مدیریت ساخت

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

تاریخ تصویب پروپوزال: ۱۳۹۸/۰۸/۲۷

تاریخ دفاع: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵

تعداد صفحات: ۱۱۳

چکیده:

با توجه به این که در فرآیند تولید سیمان پرتلند، میزان قابل توجهی از کربن دی‌اکسید تولید می‌شود و سبب آلودگی محیط زیست خواهد شد، از مخلوط فعال شده با قلیا به علت برتری در مواردی از قبیل خواص مکانیکی مطلوب‌تر و آلودگی‌های زیست‌محیطی کمتر، به عنوان جایگزین در مخلوط مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی استفاده می‌شود؛ اما ممکن است فعال‌کننده‌های قلیایی که عموماً برای فعال‌سازی استفاده می‌شوند، زمانی که مخلوط فعال‌شده با قلیا حاوی سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر باشد، منجر به آسیب‌های ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی شده و استفاده تجاری از آن را محدود کند. امروزه روش‌ها و استانداردهای متنوعی از جمله *ASTM C1260* و *ASTM C1293* برای شناسایی مصالح واکنش‌پذیر و اقداماتی برای محدود کردن خطر آسیب‌های ناشی از این واکنش در ساخت سازه‌ها و المان‌های بتنی استفاده می‌شوند. روش‌های کنونی، اکثراً با اندازه‌گیری تغییر طول نمونه‌های ملاتی و بتنی، سعی دارند واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها را بررسی کنند. برای ساخت مخلوط فعال-شده با قلیا مورد نظر در این پژوهش، از پیش‌ماده‌ی سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان ماده‌ی اصلی و برای فعال‌سازی آن نیز از ترکیب محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم استفاده شد. در این پژوهش به بررسی عملکرد مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا در برابر واکنش قلیایی سیلیسی پرداخته شد. به همین منظور مخلوط‌های ساخته شده حاوی سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر بوده و با اعمال شرایط تشدید یافته (با استفاده از دمای بالا و قلیائیت زیاد) برای کاهش زمان انجام واکنش قلیایی سیلیسی، علاوه بر سنجش تغییر طول از طریق ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوامی به ارزیابی واکنش مذکور پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، در تمامی آزمایش‌های انجام گرفته به طور مطلق و با اختلاف بسیار زیاد از مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی، برتر بوده است. به بیان دیگر هرچند قلیائیت مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا بسیار زیاد بوده است، اما در برابر واکنش قلیایی سیلیسی نسبت به مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی عملکرد بهتری را رقم زده است و همچنین در بین مشخصات مکانیکی، به ترتیب مقاومت کششی، خمشی و فشاری بیش‌ترین اثرپذیری و هم‌بستگی را با واکنش قلیایی سیلیسی داشتند. علاوه بر این، نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی با انبساط تولید شده در مخلوط‌های بتنی هم‌بستگی خوبی داشت.

واژه‌های کلیدی: بتن‌های فعال‌شده با قلیا، سرباره کوره آهن‌گدازی، واکنش قلیایی سیلیسی، تغییر طول، خواص مکانیکی، مقاومت الکتریکی

تقدیم به:

نخبات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام

تجربه‌های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز اوست.

تقدیم به مادر عزیزم

که هیچ کلمه‌ای قادر به توصیف فداکاری و مهربانی‌اش نیست.

تشکر و قدردانی:

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونان شد و به

همشینی رهروان علم و دانش محترممان نمود و خوشه چلنی از علم و معرفت را روزی‌مان

ساخت که جز با لطف و مدد او این اثر حاصل نمی‌گشت.

بدینوسیله بر خود لازم می‌دانم از استاد ارجمند و گرانقدرم جناب آقای دکتر ابراهیم قیاسوند،

که از بیچ‌کلی در این عرصه بر من دریغ ننمود و زحمات راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده

گرفتند تشکر و قدردانی نمایم.

..... فصل اول: کلیات	
..... ۱-۱. مقدمه	۳
..... ۲-۱. ضرورت انجام پژوهش	۴
..... ۳-۱. اهداف	۵
..... ۴-۱. نوآوری	۵
..... فصل دوم: مبانی علمی و مرور مطالعات گذشته	
..... ۱-۲. مقدمه	۹
..... ۲-۲. اثرات مخرب سیمان بر محیط زیست	۹
..... ۳-۲. بتن‌های فعال شده قلیایی (ژئوپلیمر)	۱۰
..... ۴-۲. ترکیبات ژئوپلیمر	۱۰
..... ۱-۴-۲. مواد پایه	۱۰
..... ۲-۴-۲. فعال ساز	۱۱
..... ۵-۲. سرباره، شایعترین ماده پایه مصرفی در ژئوپلیمرها در ایران	۱۱
..... ۱-۵-۲. تولید سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی	۱۱
..... ۲-۵-۲. انواع سرباره	۱۳
..... ۳-۵-۲. ترکیب شیمیایی و مکانیسم هیدراتاسیون	۱۳
..... ۶-۲. تفاوت ساختار بتن معمولی و بتن فعال شده با قلیا	۱۴
..... ۱-۶-۲. مخلوط‌های پر کلسیم	۱۵
..... ۲-۶-۲. مخلوط‌های کم کلسیم	۱۵
..... ۳-۶-۲. مخلوط‌های ترکیبی	۱۶
..... ۷-۲. خواص بتن فعال شده با قلیا تازه و سخت شده	۱۶
..... ۸-۲. معایب بتن فعال شده با قلیا	۱۷
..... ۹-۲. واکنش قلیایی سنگدانه (AAR)	۱۷
..... ۱-۹-۲. واکنش قلیایی کربناتی (ACR)	۱۸
..... ۲-۹-۲. واکنش قلیایی سیلیسی (ASR)	۱۹
..... ۳-۹-۲. مکانیزم واکنش قلیایی سیلیسی	۲۰
..... ۴-۹-۲. ژل واکنش قلیایی سیلیسی	۲۳
..... ۱-۴-۹-۲. ترکیبات ژل قلیایی سیلیسی	۲۴
..... ۲-۴-۹-۲. مقدار فشار تولید شده توسط ژل	۲۴
..... ۵-۹-۲. نقش کلسیم در واکنش قلیایی سیلیسی	۲۵
..... ۶-۹-۲. نقش آلومینیوم در واکنش سیلیسی قلیایی	۲۶
..... ۱۰-۲. واکنش قلیایی سیلیسی (ASR) در بتن‌های فعال شده با مواد قلیایی (AAC)	۲۷
..... ۱-۱۰-۲. تاثیر مشخصات ماده پایه (سرباره)	۲۸
..... ۲-۱۰-۲. فعال ساز قلیایی	۳۰
..... ۱-۱۰-۲. نوع فعال کننده	۳۰
..... ۲-۱۰-۲. مقدار محتوای قلیایی	۳۲

۲-۱۰-۲-۳. مدول سیلیکات آب شیشه.....	۳۳
۲-۱۰-۳. سنگدانه‌های واکنش پذیر.....	۳۵
۲-۱۱. روش‌های ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی.....	۳۹
۲-۱۲. روش‌های کنترل واکنش قلیایی سیلیسی.....	۴۳
۲-۱۳. اثر واکنش قلیایی سیلیسی بر مشخصات مکانیکی بتن و پتانسیل استفاده از آن برای ارزیابی آن واکنش.....	۴۷
۲-۱۴. جمع‌بندی.....	۵۱
فصل سوم: مواد، مصالح و برنامه آزمایشگاهی	
۳-۱. مقدمه.....	۵۵
۳-۲. معرفی مواد و مصالح مصرفی.....	۵۵
۳-۲-۱. مصالح سنگی.....	۵۵
۳-۲-۲. ماده سیمانی.....	۵۶
۳-۲-۳. آب مصرفی.....	۵۷
۳-۲-۴. ماده فعال‌ساز قلیایی.....	۵۷
۳-۲-۴-۱. سدیم هیدروکسید (محلول سود).....	۵۷
۳-۲-۴-۲. سیلیکات سدیم (آب شیشه).....	۵۸
۳-۳. نسبت‌های موثر بر خواص بتن‌های فعال‌شده قلیایی.....	۵۹
۳-۳-۱. نسبت آب به مواد چسباننده قلیایی.....	۵۹
۳-۳-۲. نسبت وزنی محلول قلیایی به سرباره.....	۵۹
۳-۴. طرح‌های مخلوط.....	۶۰
۳-۴-۱. ساخت و عمل‌آوری ملات طبق آزمایش استاندارد <i>ASTM C1260</i>	۶۰
۳-۴-۱-۱. نسبت مخلوط ملات.....	۶۰
۳-۴-۱-۲. عمل‌آوری و نگهداری ملات.....	۶۱
۳-۴-۲. ساخت و عمل‌آوری بتن طبق آزمایش استاندارد <i>ASTM C1293</i>	۶۱
۳-۴-۲-۱. نسبت مخلوط بتن.....	۶۱
۳-۴-۲-۲. عمل‌آوری و نگهداری بتن.....	۶۲
۳-۴-۳. عملیات ساخت.....	۶۳
۳-۵. برنامه آزمایشگاهی.....	۶۳
۳-۶. آزمایش انجام شده روی ملات‌های سخت شده.....	۶۵
۳-۶-۱. آزمایش استاندارد <i>ASTM C1260</i>	۶۵
۳-۶-۲. تعیین مقاومت خمشی ملات سخت‌شده.....	۶۶
۳-۶-۳. تعیین مقاومت فشاری ملات سخت شده.....	۶۷
۳-۷. آزمایش انجام شده روی بتن سخت شده.....	۶۷
۳-۷-۱. آزمایش تسریع یافته <i>ASTM C1293</i>	۶۷
۳-۷-۲. تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده.....	۶۸
۳-۷-۳. تعیین مقاومت کششی بتن سخت شده.....	۶۸
۳-۷-۴. تعیین مقاومت خمشی بتن سخت شده.....	۶۸

۶۹	۳-۷-۵. مقاومت الکتریکی
۷۰	۳-۸. جمع‌بندی
	فصل چهارم: بحث و نتایج
۷۳	۴-۱. مقدمه
۷۳	۴-۲. مطالعه ملاتهای ساخته شده
۷۳	۴-۲-۱. نتایج آزمایش <i>ASTM C1260</i>
۷۵	۴-۲-۲. نتایج مقاومت فشاری ملات
۷۷	۴-۲-۳. نتایج مقاومت خمشی ملات
۷۹	۴-۳. مطالعه نمونه‌های بتنی
۸۰	۴-۳-۱. نتایج انبساط آزمایش <i>ASTM C1293</i> تسریع‌یافته
۸۲	۴-۳-۲. نتایج مقاومت فشاری بتن
۸۴	۴-۳-۳. نتایج مقاومت خمشی بتن
۸۶	۴-۳-۴. نتایج مقاومت کششی بتن به روش دونیم‌شدن
۸۸	۴-۳-۵. نتایج مقاومت الکتریکی
۹۲	۴-۴. جمع‌بندی
	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۹۹	۵-۱. مقدمه
۹۹	۵-۲. نتایج
۱۰۰	۵-۳. پیشنهادها
	منابع

جدول ۱-۲ مقاومت نسبی ملات استاندارد حاوی سرباره در نسبت به سیمان معمولی در رده‌های مختلف.....	۱۳
جدول ۲-۲ خلاصه مراحل <i>ASR</i> و معادلات شیمیایی آنها.....	۲۲
جدول ۳-۲ خلاصه روشهای آزمایشی مورد استفاده برای واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط‌های فعال شده با قلیا (شی و ژنگ، ۲۰۰۷).....	۴۲
جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی.....	۵۶
جدول ۲-۳ مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی در نمونه‌های ملات مطابق با استاندارد <i>ASTM C1260</i>	۵۶
جدول ۳-۳ مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی در نمونه‌های بتن مطابق با استاندارد <i>ASTM C1293</i>	۵۶
جدول ۴-۳ مشخصات و خصوصیات مواد سیمانی مصرفی طبق نتایج آزمون <i>XRD</i>	۵۷
جدول ۵-۳ مشخصات سیلیکات سدیم (آب‌شیشه).....	۵۸
جدول ۶-۳ مشخصات طرح‌های ملاتی ساخته شده.....	۶۱
جدول ۷-۳ مشخصات طرح‌های بتنی ساخته شده.....	۶۳
جدول ۸-۳ آزمایشات انجام شده، استانداردهای مورد نظر، برنامه زمانی آزمایشها و ابعاد مخلوطها تهیه شده.....	۶۳
جدول ۱-۴ مقدار رشد و یا افت خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی سه‌ماهه نسبت به یک‌ماهه.....	۹۴
جدول ۲-۴ مقدار رشد و یا افت خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی شش‌ماهه نسبت به یک‌ماهه.....	۹۵
جدول ۳-۴ درجه‌بندی میزان حساسیت و اثرگذاری خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی از واکنش قلیایی سیلیسی (مخلوط‌های بتنی).....	۹۶

- شکل ۱-۲ فرایند تولید سرباره (اوزبای و همکاران، ۲۰۱۶)..... ۱۲
- شکل ۲-۲ الف) نمودار سه‌گانه $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ مواد سیمانی، ب) فازهای هیدرات در سیستم $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ (لوتنباخ و همکاران، ۲۰۱۱)..... ۱۴
- شکل ۳-۲ مکانیسم ترک خوردگی ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن (عبدالرحمان و همکاران، ۲۰۱۵)..... ۲۰
- شکل ۴-۲ نمایش دو بعدی برهم کنش بین سیلیس موجود سنگدانه‌ها و محلول منفذی بتن الف) قبل از انجام واکنش قلیایی سیلیسی ب) پس از انجام واکنش قلیایی سیلیسی (مکانیسم‌های تبادل یونی در داخل حلقه‌ها نشان داده شده است (قلیاده - وایقان و رجب پور، ۲۰۱۷)..... ۲۲
- شکل ۵-۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن با سیمان پرتلند معمولی (سوآمی، ۲۰۰۲)..... ۲۳
- شکل ۶-۲ تغییر در ترکیب ژل ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی (کیم و همکاران، ۲۰۱۵): با گذشت زمان ژل تمایل به ترکیب کلسیم، آزادسازی قلیاها و رویکردهایی به ترکیب (C-S-H) دارد..... ۲۶
- شکل ۷-۲ مقایسه انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن با سیمان پرتلند معمولی و بتن سرباره‌های فعال شده باقلیا (باخارف و همکاران، ۲۰۰۱)..... ۲۹
- شکل ۸-۲ تاثیر انواع فعال‌کننده بر روی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه (باخارف، ۲۰۰۱)..... ۳۰
- شکل ۹-۲ تاثیر غلظت سدیم هیدروکسید بر روی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا (شی و همکاران، ۲۰۱۷)..... ۳۲
- شکل ۱۰-۲ تاثیر مقدار قلیائیت در انبساط ناشی از واکنش قلیایی (یانگ و همکاران، ۱۹۹۹)..... ۳۳
- شکل ۱۱-۲ تأثیر مدول آبشیشه بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه (یانگ و همکاران، ۱۹۹۹)..... ۳۴
- شکل ۱۲-۲ تأثیر دوز قلیایی و مدول سیلیکات بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا از ۲۸ روز (شی و همکاران، ۲۰۱۸)..... ۳۴
- شکل ۱۳-۲ مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش تحت شرایط: الف) آزمایش تسریع شده (۲۸ روز عمل‌آوری مداوم با بخار در معرض دمای ۷۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد) ب) آزمایش استاندارد (معرض دمای ۳۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد برای مدت یکسال) (کریونکو و همکاران، ۲۰۱۴)..... ۳۶
- شکل ۱۴-۲ تأثیر اندازه دانه بر انبساط و سطح تماس سنگدانه (یانگ و پو، ۱۹۹۹)..... ۳۷
- شکل ۱۵-۲ مقایسه انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های فعال شده با قلیا و ملات با سیمان پرتلند معمولی در معرض شرایط مختلف (تالینگ و برندستتر، ۱۹۸۹). (AAS: سرباره فعال شده با قلیایی (OPC): سیمان پرتلند معمولی؛ N: محلول یک مولار سود، W: آب در دمای درجه سلسیوس ۸۰، S: بخار در دمای ۸۰ درجه سلسیوس)..... ۴۰
- شکل ۱۶-۲ اثر مدول آب‌شیشه بر مخلوط سرباره فعال شده با آب‌شیشه، و حاوی ۶ درصد اکسید سدیم (محتوای قلیایی) (العتیبي، ۲۰۰۸)..... ۴۱
- شکل ۱۷-۲ تأثیر غلظت محلول سود بر مقاومت فشاری (ویلیامسون و جونگر، ۲۰۱۶)..... ۴۵
- شکل ۱۸-۲ انبساط ملات‌های سرباره‌ای فعال شده با قلیا حاوی: الف) خاکستر بادی ب) متاکائولین (شی و همکاران، ۲۰۱۸)..... ۴۶
- شکل ۱۹-۲ تصویر شماتیک از واکنش قلیایی سیلیسی در حضور $LiNO_3$ (فنگ و همکاران، ۲۰۱۰)..... ۴۷
- شکل ۲۰-۲ کاهش مشخصات مکانیکی بتن در اثر افزایش انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی (دونانت و سربونر، ۲۰۱۶)..... ۴۸
- شکل ۱-۳ قالب آماده برای آزمایش $ASTM C1260$ ۶۵
- شکل ۲-۳ دستگاه قرائت کرنش سنج (تغییرات طول) و میله مرجع مطلق با استاندارد $ASTM C490$ ۶۶

- شکل ۳-۳ شمایی دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ۷۰
- شکل ۴-۱ نتایج انبساط مطابق با استاندارد *ASTM C1260* در ملاتهای حاوی سنگ‌دانه تهیه شده از یکی از معادن آذربایجان ۷۴
- شکل ۴-۲ نتایج مقاومت فشاری ملات‌های عمل‌آوری‌شده در محیط آزمایشگاهی (کنترل) ۷۶
- شکل ۴-۳ نتایج مقاومت فشاری ملات‌های عمل‌آوری‌شده در محیط تشدید یافته ۷۷
- شکل ۴-۴ نتایج مقاومت خمشی ملات‌های عمل‌آوری‌شده در محیط آزمایشگاهی (کنترل) ۷۸
- شکل ۴-۵ نتایج مقاومت خمشی ملات‌های عمل‌آوری‌شده در محیط تشدید یافته ۷۸
- شکل ۴-۶ نتایج انبساط نمونه‌های بتنی قرار گرفته در هر دو محیط مورد آزمایش ۸۱
- شکل ۴-۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی عمل‌آوری‌شده در محیط آزمایشگاهی (کنترل) ۸۳
- شکل ۴-۸ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی عمل‌آوری‌شده در محیط تشدید یافته ۸۴
- شکل ۴-۹ نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی ۸۵
- شکل ۴-۱۰ نتایج آزمایش مقاومت کششی به روش دونیم‌شدن نمونه‌های بتنی ۸۶
- شکل ۴-۱۱ نتایج آزمایش انبساط در برابر مقاومت فشاری در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه) ۸۷
- شکل ۴-۱۲ نتایج آزمایش انبساط در برابر مقاومت خمشی در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه) ۸۷
- شکل ۴-۱۳ نتایج آزمایش انبساط در برابر مقاومت کششی در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه) ۸۸
- شکل ۴-۱۴ نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی ۸۹
- شکل ۴-۱۵ نتایج مقاومت الکتریکی در برابر انبساط (تغییرات طول) در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه) ۹۰
- شکل ۴-۱۶ نتایج مقاومت الکتریکی در برابر مقاومت فشاری در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه) ۹۱
- شکل ۴-۱۷ نتایج مقاومت الکتریکی در برابر مقاومت خمشی در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه) ۹۱
- شکل ۴-۱۸ نتایج مقاومت الکتریکی در برابر مقاومت کششی در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه) ۹۲

<i>Ordinary Portland Cement</i>	<i>OPC</i>	سیمان پرتلند معمولی
<i>Alkali -Activated Cement</i>	<i>AAC</i>	سیمان فعال شده با قلیا
<i>Supplementary Cementitious Material</i>	<i>SCM</i>	مواد مکمل سیمانی
<i>Alkali -Aggregate Reaction</i>	<i>AAR</i>	واکنش قلیایی سنگدانه
<i>Alkali -Carbonate Reaction</i>	<i>ACR</i>	واکنش قلیایی کربناتی
<i>Alkali-Silica Reaction</i>	<i>ASR</i>	واکنش قلیایی سیلیسی
<i>Ground Granulated Blast-furnace Slag</i>	<i>GGBFS</i>	سرباره کوره آهن‌گدازی
<i>Alkali Activated Slag</i>	<i>AAS</i>	سرباره فعال شده با قلیا

فصل اول:

کلیات

۱-۱. مقدمه

بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی (OPC)، در حال حاضر گسترده‌ترین کاربرد را در بین مصالح ساختمانی را دارد و سالانه سرمایه‌های زیادی صرف تولید سیمان پرتلند معمولی می‌شود. یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های استفاده از سیمان پرتلند معمولی، انرژی مصرف شده و انتشار گازهای گلخانه‌ای^۱ است. از آنجایی که استفاده از سیمان‌های فعال شده با قلیا (AAC) به‌طور چشم‌گیری سبب بهبود خواص مطلوب مهندسی نظیر مقاومت فشاری بالا (براس و آتکینسون^۲، ۲۰۰۲: ۸۷۹-۸۶۵)، مقاومت در برابر حمله سولفاتی (باخارف^۳ و همکاران، ۲۰۰۲: ۲۱۶-۲۱۱)، خوردگی اسیدی (باخارف و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۶۱۱-۱۶۰۷)، نفوذ یون کلر (بوندار و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۹۹-۱۹۱) و دیگر موارد می‌شود، به عنوان جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند معمولی مورد توجه قرار گرفته است. سیمان‌های فعال شده با قلیا محصول واکنش شیمیایی مصالح حاوی مواد جامد آلومینوسیلیکات همچون سرباره، خاکستر بادی و یا متاکالین با یک منبع قلیایی است. محصول یا ژل این واکنش شیمیایی می‌تواند یک ساختار شبکه شبيه به پلیمرهای ترموست آلی داشته باشد. به همین دلیل "پلیمرهای معدنی" یا "ژئوپلیمرها"^۴ نامیده می‌شود (جوئنگر^۵ و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۲۴۳-۱۲۳۲).

اما هنگامی که مخلوط‌های مبتنی بر سیمان فعال شده با قلیا حاوی سنگدانه‌های واکنش پذیر باشند این نگرانی وجود دارد که منبع قلیایی مورد استفاده در این مخلوط‌ها پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی (ASR) را افزایش دهد. واکنش قلیایی سیلیسی، که به عنوان "سرطان بتن"^۶ شناخته می‌شود، یک واکنش شیمیایی بین هیدروکسید قلیا در سیمان و مواد معدنی سیلیسی موجود در سنگدانه‌ها است که در نتیجه ژل سیلیکاتی قلیایی حاصل می‌گردد. این پدیده باعث انقباض در بتن می‌شود که در برخی موارد منجر به خرابی شده است (ویسر^۷، ۲۰۱۸: ۳۰-۱۸؛ پیگناتلی^۸ و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۱۰-۱۹۶). بنابراین، آگاهی از این موضوع که آیا مخلوط‌های مبتنی بر سیمان‌ها فعال شده با قلیا حساس به واکنش قلیایی سیلیسی هستند یا نه، قبل از تولید این نوع مخلوط‌ها ضروری است. اگرچه در مقایسه با مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی، مطالعات مربوط به واکنش قلیایی سیلیسی در بتن‌های فعال شده با قلیا بسیار کمتر و همیشه متناقض بوده است (وانگ و نوگاچی^۹، ۲۰۲۰: ۱۱۹-۱۰۵). لازم به ذکر است جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند معمولی با مصالح حاوی مواد جامد آلومینوسیلیکات بدون فعال‌سازی با مواد قلیایی و استفاده از آن تنها به عنوان مواد مکمل سیمانی (SCM)، یکی از اقدامات موثر برای کاهش وقوع واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه

1. Greenhouse Gases

2. Brough & Atkinson

3. Bakharev

4. Geopolymer

5. Juenger

6. Concrete Cancer

7. Visser

8. Pignatelli

9. Wang & Noguchi

مبتنی بر کاهش قلیایت و کل محتوای کلسیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (ویسر، ۲۰۱۸: ۳۰-۱۸؛ پیگناتلی، ۲۰۱۳: ۲۱۰-۱۹۶). میزان اثر بخشی مصالح مکمل سیمانی در انبساط واکنش قلیایی سیلیسی به عواملی همچون ماهیت و نوع مصالح مکمل سیمانی، میزان جایگزینی در سیمان، میزان واکنش‌پذیری سنگدانه و مقدار قلیائیت سیمان پرتلند بستگی دارد (کانداسامی و شهاتا^۱، ۲۰۱۴: ۹۹-۹۲؛ اوزبای^۲ و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۳۴-۴۲۳).

در این مطالعه به بررسی جایگزینی کامل سرباره فعال شده با قلیا به عنوان نوعی سیمان فعال شده، که می‌تواند منافع مهندسی را حاصل کند، پرداخته شده است. در این پژوهش قصد داریم با اعمال شرایط تشدید یافته (استفاده از دما و قلیائیت بالا) برای کاهش زمان انجام واکنش، علاوه بر سنجش تغییر طول از طریق ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوامی به پیش‌بینی وقوع واکنش مخرب قلیایی سیلیسی پرداخته شود. پس از انجام آزمایش‌های مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی) و دوامی (مقاومت الکتریکی) به استخراج روابط احتمالی موجود بین روش‌های متداول و روش پیشنهادی پرداخته و در صورت قابل‌اعتنا بودن همبستگی بین نتایج، می‌توان روش ارزیابی جدیدی پیشنهاد نمود که بتواند نواقص روش‌های قبلی را تاحدودی برطرف سازد.

۱-۲. ضرورت انجام پژوهش

همان‌طور که می‌دانیم مقادیر قلیایی موجود در بتن به ۰/۶ درصد وزن سیمان محدود شده است. اما در بتن‌های فعال شده با مواد قلیایی، بدون شک مقادیر قلیایی موجود از حد تعیین‌شده بالاتر است. لذا لازم است با توجه به روند رو به رشد استفاده از بتن‌های حاوی مواد فعال‌شده با قلیا دنیا دوام این محصولات در معرض واکنش‌های قلیایی سیلیسی بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. می‌دانیم واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها، عموماً واکنشی است که در درازمدت آثار آن مشهود می‌گردد. لذا در آزمایش‌های استاندارد ارزیابی این واکنش، محیط به گونه‌ای مهیا می‌گردد که آثار واکنش‌ها در مدت زمان کمتری نمایان گردد و عموماً روش ارزیابی این واکنش در استانداردهای رایج دنیا، سنجش تغییر طول است. برخی از آن‌ها کوتاه مدت و برخی بلند مدت بوده که واضح است اعتبار نتایج روش‌های بلندمدت بیشتر است. روش‌های بلندمدت نیازمند زمان و روش‌های کوتاه از اعتبار کمتری برخوردار است. ایده‌آل‌ترین روش، سریع‌ترین و درعین حال قابل‌اعتمادترین روش است.

قاعداً به دلیل تغییراتی که واکنش بر ساختار داخلی بتن ایجاد می‌کند، خصوصیات بتن می‌تواند دست‌خوش تغییراتی شود. از این‌رو، محققین در پی آن هستند که بتوانند با استفاده از تغییراتی که توسط واکنش قلیایی سیلیسی در مشخصه‌های مکانیکی و سایر خصوصیات بتن ایجاد می‌شود، از آن‌ها به‌عنوان روشی جدید برای ارزیابی واکنش استفاده کنند. علاوه بر این چالش موجود در عدم وجود روش ایده‌آل برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها، کنترل و کاهش اثرات مخرب واکنش قلیایی سیلیسی نیز یکی از مشکلات موجود است.

¹. Kandasamy & Shehata

². Özbay

۱-۳. اهداف

در این پژوهش سعی شده است اولاً، عملکرد مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نسبت به مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی بررسی شود. ثانیاً، علاوه بر روش‌های متداول ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی که بر مبنای سنجش تغییر طول است، از طریق ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوامی نیز به ارزیابی واکنش مذکور پرداخته شود و نیز شدت اثرپذیری و هم‌بستگی خصوصیات مکانیکی و دوامی مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی و مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی بررسی گردد.

۱-۴. نوآوری

اثرپذیری مشخصه‌های مکانیکی از واکنش قلیایی سیلیسی باعث شده روش‌های جدیدی بر پایه‌ی آن‌ها جهت ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی و بررسی واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها معرفی شوند. در این تحقیق نیز سعی بر آن است که با استفاده از سایر ویژگی‌های بتن، به غیر از انبساط تولید شده، روشی جدید جهت بررسی و ارزیابی واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها ارائه شود.

مواردی که این تحقیق را از تحقیقات پیشین متمایز می‌نماید به شرح زیر است:

- بررسی عملکرد مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی
- بررسی اثر واکنش قلیایی سیلیسی بر مشخصه‌ها مکانیکی بتن (مقاومت فشاری، خمشی و کششی) و تعیین ارتباط بین آن‌ها
- ارزیابی تأثیرپذیری مقاومت الکتریکی بتن از واکنش قلیایی سیلیسی
- بررسی ارتباط بین مقاومت الکتریکی و پیشرفت واکنش قلیایی سیلیسی و ارائه‌ی یک روش جدید برای ارزیابی واکنش

پایان‌نامه حاضر در پنج فصل و به شرح ذیل تدوین شده است:

- در فصل حاضر کلیات، اهداف و نوآوری‌های این پژوهش بیان شده است.
- در فصل دوم مرور ادبیات فنی به موضوع پژوهش شامل معرفی بتن‌های فعال شده با مواد قلیایی و واکنش قلیایی سیلیسی، بررسی واکنش قلیایی سیلیسی در بتن‌های فعال شده با مواد قلیایی و انواع روش‌های ارزیابی و کنترل این واکنش مخرب و تأثیر آن بر مشخصات مکانیکی بتن پرداخته می‌شود.
- فصل سوم مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها، توضیح جزئیات ساخت و روش انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.
- فصل چهارم به بیان نتایج آزمایش‌های انجام شده، تفسیر آن‌ها و مقایسه نتایج با یکدیگر پرداخته شده است.
- فصل پنجم، نتیجه‌گیری و چند پیشنهاد برای پیگیری تحقیقات در این زمینه ارائه شده است.

فصل دوم:

مبانی علمی و مرور مطالعات گذشته

۲-۱. مقدمه

بتن ماده‌ای مرکب است که اساساً از یک ماده چسباننده به همراه دانه‌ها و ذرات سنگی که توسط جز چسباننده پوشانده می‌شود، ساخته شده است. در بتن با سیمان‌های هیدرولیکی، چسباننده از اختلاط سیمان هیدرولیکی با آب ساخته می‌شود. امروزه جزء چسباننده بتن تنها به سیمان‌های معمولی پرتلند (حاوی ۱۰۰ درصد کلینکر^۱) محدود نیست و از سایر سیمان‌ها به همراه مواد افزودنی معدنی و شیمیایی نیز استفاده می‌شود. در قرن بیستم بتن با سیمان پرتلند، گسترده‌ترین کاربرد را در بین مصالح ساختمانی داشته است. دلیل این امر آن است که بتن، بیش‌ترین خواص مطلوب مهندسی را با هزینه کم تأمین کرده و علاوه بر این، مقادیر زیادی از مواد زائد صنعتی می‌تواند مجدداً به عنوان مواد سیمانی یا سنگدانه در ساخت بتن مصرف شوند (رمضانپور و شاه نظری، ۱۳۹۰).

۲-۲. اثرات مخرب سیمان بر محیط‌زیست

بتن ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی به طور گسترده در سراسر جهان به عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شود. با این حال تولید سیمان پرتلند معمولی همراه با مصرف انرژی زیاد و انتشار مقدار قابل توجه گاز گلخانه‌ای است. امروزه، افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی از جمله نگرانی‌هایی به حساب می‌آید که توجه همگان را به خود جلب کرده است. محققین در زمینه‌های مختلف در پی یافتن راهکارهای مناسب برای کاهش این آلاینده‌ها هستند. آلودگی هوا از پر اهمیت‌ترین مخاطرات محیط‌زیست بوده که عوامل مختلفی بر روی آن تاثیر می‌گذارند. اما یکی از آلاینده‌ترین صنایع به لحاظ تولید حجم بالای گاز کربن دی اکسید، صنعت سیمان (به عنوان اصلی‌ترین تولیدکننده جزء چسباننده در ساختار بتن) است. این گاز یکی از انواع یا به عبارتی مهم‌ترین نوع گازهای گلخانه‌ای است که از مسبب اصلی گرم‌تر شدن کره زمین و کاهش میزان تابش نور خورشید به زمین بوده و در زمره مهم‌ترین آلاینده‌های هوا محسوب می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده در اواخر قرن بیستم، تولید سیمان پرتلند معمولی به تنهایی عامل ایجاد هفت درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است. از سوی دیگر، در جریان تولید سیمان مقدار نسبتاً زیادی انرژی استفاده می‌شود. بنابراین افزایش آگاهی اجتماعی و محیط‌زیستی از تاثیر تولید سیمان پرتلند، منجر به تلاش گسترده صنعت در زمینه بتن و مصالح ساختمانی برای جایگزین کردن سیمان با سایر مواد انجام گردیده است (آدام نویل، ۱۳۹۰؛ ترجمه: رمضانپور و شاه نظری؛ رمضانپور و همکاران، ۲۰۱۸: ۶۸۴-۶۷۳). یکی از انواع جایگزین‌های سیمان پرتلند معمولی، مواد معدنی فعال شده با مواد قلیایی است.

^۱ - کلینکر مخلوط غیرهمگنی از چندین کانی است که در دمای زیاد بر اثر فعل و انفعالات اکسید کلسیم و اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم و آهن تولید می‌گردد.

۲-۳. بتن‌های فعال شده قلیایی (ژئوپلیمر)

بتن‌های فعال شده قلیایی (ژئوپلیمرها) با حذف کامل استفاده از سیمان پرتلند در بتن در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه دانشمندان قرار گرفته‌اند. در فرایند فعال‌سازی مواد معدنی نظیر سرباره با مواد قلیایی، اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسوم موجود در مواد معدنی در حضور فلزهای قلیایی با هم واکنش داده و محصول این واکنش نقش همان جزء چسباننده^۱ را بازی نموده و با پوشش مصالح سنگی منجر به تولید بتنی جدید می‌گردد. از این بتن‌ها با نام بتن‌های ژئوپلیمری نیز یاد می‌شود. اما می‌توان گفت عنوان بتن‌های فعال شده قلیایی عنوانی جامع‌تر است. لازم به ذکر است ساخت بتن فعال شده قلیایی در مقایسه با بتن‌های ساخته شده از سیمان‌های معمولی، می‌تواند منجر به کاهش بین ۴۵ تا ۸۰ درصدی تولید گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان شود (دیویدویتس^۲، ۱۹۹۴: ۲۷۸-۲۶۳).

۲-۴. ترکیبات ژئوپلیمر

۲-۴-۱. مواد پایه

برای ساخت بتن فعال شده با قلیا نیاز به یک منبع سیلیکات آلومینیومی به عنوان ماده پایه است. که به نوعی جایگزین سیمان در بتن معمولی است. به‌طور کلی پوزولان‌های طبیعی یا مصنوعی و یا برخی مواد معدنی نظیر سرباره کوره آهن‌گدازی که منبع غنی از مواد آلومیناموسیلیکاتی هستند. می‌توان بدین منظور استفاده نمود (اوجا و آگاروال^۳، ۲۰۲۱: ۲۰-۱؛ چنگ و چیو^۴، ۲۰۰۳: ۲۱۰-۲۰۵).

در این بین سرباره کوره آهن‌گدازی (*GGBFS*) اهمیت ویژه‌ای دارد. سرباره به دلیل داشتن درصد بالای کلسیم، عملکردی شبیه سیمان پرتلند معمولی داشته و می‌تواند در کنار یک محلول قلیایی با آب واکنش دهد و خاصیت چسبندگی ایجاد نماید. در ژئوپلیمرها می‌توان حتی ذره‌ای سیمان معمولی استفاده ننمود. سرباره برخلاف سایر مواد معدنی، هم خاصیت سیمانی و هم خاصیت پوزولانی دارد. زمانی که سرباره به تنهایی با آب ترکیب می‌شود به‌صورت ذرات ریز تجزیه شده، اما تشکیل یک لایه محافظ ناکارآمد از جنس Ca^+ ، مانع از ادامه واکنش بعدی می‌شود. پوشش ایجاد شده بر روی سطح ذرات سرباره که پس از ترکیب با آب تشکیل می‌شود، مانع انجام هیدراسیون در مرحله بعدی خواهد شد. اگر *pH* مخلوط به اندازه کافی بالا نگه‌داشته شود، این لایه محافظ شکسته و واکنش ادامه پیدا می‌کند. از این‌رو یک محلول قلیایی برای شکستن این پوشش لازم است. در واقع برای داشتن یک واکنش پیوسته باید یک محلول قلیایی مناسب به مخلوط اضافه شود. محلول قلیایی *pH* مخلوط را افزایش داده و از تشکیل لایه محافظ در سطح سرباره جلوگیری می‌کنند و در نتیجه حلالیت فاز شیشه

1. Binder

2. Davidovits

3. Ojha & Aggarwal

4. Cheng & Chiu .

سرباره ادامه می‌یابد. نقش قلیاها، شکستن باندهای موجود در ساختار فاز شیشه سرباره و بنابراین افزایش سرعت حل شدن اجزای یونی است و این محلول قلیایی، باید از یک منبع خارجی تامین گردد (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۰: ۵۲۹-۱۲۰).

۲-۴-۲. فعال ساز

بر اساس تعاریف، ماده فعال‌ساز، به محلولی اطلاق می‌شود با خاصیت قلیایی که موجب انحلال یون‌های آلومینیوم و سیلیسیم موجود در ماده پایه شده و با انجام واکنش، ترکیب خمیر ژئوپلیمری را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این غالباً فعال‌سازی به روش‌های گوناگون نظیر حرارتی، مکانیکی و شیمیایی صورت می‌گیرد که مهم‌ترین روش، فعال‌سازی شیمیایی است (دیویدویتس، ۱۹۹۹). محلول قلیایی مورد مصرف، مهم‌ترین ماده پس از ماده آلومینوسیلیکاتی در فرآیند تولید بتن فعال‌شده با قلیاست. رایج‌ترین محلول قلیایی مورد استفاده، ترکیبی از سدیم هیدروکسید ($NaOH$) و یا پتاسیم هیدروکسید (KOH) به همراه سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) یا پتاسیم سیلیکات (Na_2SiO_3) است (بوندار^۲ و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۰۶۵-۴۰۷۱). نوع محلول قلیایی و غلظت آن بر فرآیند پلیمریزاسیون تاثیرگذار است. پتانسیل فعال‌سازی به ویژه از نظر مقاومت فشاری فعال‌کننده‌ها با در نظر گرفتن مقدار غلظت یکسان دارای ترتیب زیر است (کوملنویچ^۳ و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۵-۴۲):



۲-۵. سرباره، شایع‌ترین ماده پایه مصرفی در ژئوپلیمرها در ایران

از آنجا که تنوع مواد پایه و فعال‌ساز از گستردگی زیادی برخوردار است، می‌توان نتیجه گرفت که قیمت تمام‌شده بتن‌های فعال‌شده با قلیا وابسته به نوع مواد خام اولیه، مشخصات فنی مورد نیاز و منطقه مورد استفاده است. به‌طور مثال موادی چون خاکستر بادی که از محصولات جانبی در کوره‌های با پایه زغال‌سنگ می‌باشند در بسیاری از کشورهای دنیا، به وفور تولید می‌گردد و انباشت آن مسائل زیست‌محیطی ایجاد کرده است. در محدوده کشورهای اروپایی و در دسترس بودن منابع خاکستر بادی وافر و غنی در این مناطق استفاده از این ماده به‌عنوان ماده پایه مزایا اقتصادی و زیست‌محیطی زیادی در پی خواهد داشت. در ایران اگرچه موادی چون خاکستر بادی و متاکائولین تولید نمی‌شود، اما سرباره‌های کوره آهن‌گدازی تولیدشده از صنایع تولید آهن، می‌تواند به‌عنوان ماده پایه مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۵-۱. تولید سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی

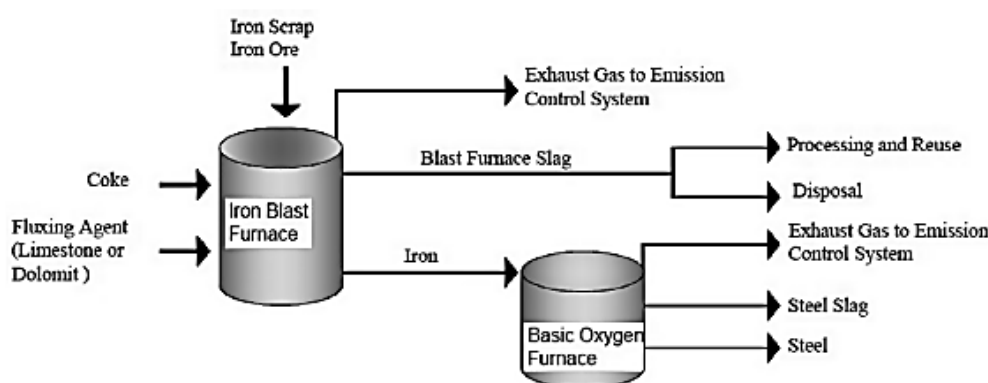
سرباره کوره آهن‌گدازی ($GGBFS$) که به اختصار سرباره نامیده می‌شود، محصول جانبی کوره ذوب‌آهن در فرآیند تولید چدن بوده که آهن خام نیز نامیده می‌شود، شکل ۲-۱ به‌طور تصویری فرآیند

¹. Zhang

². Bonadar

³. Komljenović

تهیه سرباره را نشان می‌دهد (پیاتاک^۱ و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۶۶-۲۳۶). اگر سرباره به آرامی در هوا خنک شود، مواد متشکله شیمیایی سرباره ساختار کریستالی داشته و معمولاً به شکل میلیت متبلور می‌شوند که در دمای معمولی با آب واکنش نمی‌دهد. این مواد اگر به صورت ذرات خیلی نرم آسیاب شوند، به میزان نسبتاً ضعیفی، سیمانی کننده و پوزولانی خواهد بود. با این وجود، هنگامی که سرباره مذاب با دمای زیاد، به وسیله‌ی جت آب، به سرعت سرد شود، کمتر محصول کریستالی تشکیل داده و قسمت بیشتر آن آهک، منیزیم، سیلیس و آلومین به شکل غیر متبلور یا حالت شیشه‌ای خواهد بود. در فرایند تسریع شده خنک کردن سرباره، محصول حاصل به خاطر ذرات هم اندازه‌ی با ماسه، سرباره دان شده نامیده می‌شود. در حالی که سرباره‌ی سرد شده با هوا و مقدار محدود آب (با سرعت کم) به شکل گندله است و سرباره گندله شده نامیده می‌شود معمولاً سرباره دان شده دارای ساختار آمورف بیشتری است. حداقل میزان آمورف بودن برای آنکه بتوان به عنوان سیمان جایگزین کرد، ۷۰ درصد است. برای افزایش فعالیت سیمانی در سنین اولیه، می‌توان سرباره را بیشتر آسیاب نمود تا به بلین بالاتری نسبت به سیمان برسد. با این وجود وقتی که هر دو محصول به میزان بلین ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر مربع بر کیلوگرم آسیاب شوند، خواص سیمانی رضایت بخشی را می‌دهند. به‌طور کلی با افزایش ریزی مواد پودری نظیر سیمان، سرباره و یا پوزولان‌ها می‌توان سرعت واکنش پذیری را افزایش داد (اوزبای و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۳۴-۴۲۳).



شکل ۱-۲ فرایند تولید سرباره (اوزبای و همکاران، ۲۰۱۶)

اگرچه مشخصات اندازه دانه، ترکیب شیشه و مقدار شیشه عوامل اصلی تعیین‌کننده‌ی فعالیت خاکستر بادی و سرباره‌ها هستند، اما واکنش‌زایی خود شیشه با سابقه حرارتی مصالح نیز تغییر می‌کند. شیشه‌ای که از دمای بیشتر به وجود می‌آید و سریع‌تر سرد می‌شود، ساختار نامنظم‌تری داشته و بنابراین، واکنش‌زایی بیشتری خواهد داشت (پیاتاک، ۲۰۱۵: ۲۶۶-۲۳۶).

^۱. Piatak

۲-۵-۲. انواع سرباره

شایع‌ترین ماده سیمانی در بتن‌های ژئوپلمیری، سرباره کوره بلند آهن است. اگر چه سرباره‌های دیگری مانند سرباره فسفر نیز می‌تواند فعال شود. با این حال فعالیت هیدرولیکی آن به اندازه سرباره کوره بلند بالا نبوده و فعال شدن آن‌ها کمتر است. سرباره در انواع مختلف و کلاس‌های متفاوت یافت می‌شود که معمولاً بر اساس مقدار وجود اکسید کلسیم در آن، انواع آن از یکدیگر تمیز داده می‌شوند. سرباره‌های حاوی درصد بالای CaO بتن زودگیر را تشکیل می‌دهند و از طرفی نیز گاهی دیده شده است که مقدار خیلی بالای آن‌ها در بتن منجر به بروز مشکلات دوامی می‌شود (والاه و رانگان^۱، ۲۰۰۶؛ گورلی^۲، ۲۰۱۱) پس در هنگام انتخاب مواد پایه باید به این موضوع توجه نمود.

استاندارد ASTM C989 (۲۰۱۲) سرباره‌ها را براساس میزان فعالیت آن‌ها به سه رده ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ تقسیم نموده است. البته معیار این تقسیم‌بندی صرفاً مقاومت فشاری است. بر این اساس رده مقاومتی از تقسیم مقاومت فشاری ملات حاوی ۵۰ درصد سرباره بر مقاومت فشاری ملات شاهد (سیمان ۱۰۰ درصد کلینگری) حاصل می‌گردد. در جدول ۱-۲ رده‌های مختلف سرباره براساس مقاومت ملات استاندارد نشان داده شده است.

جدول ۱-۲ مقاومت نسبی ملات استاندارد حاوی سرباره در نسبت به سیمان معمولی در رده‌های مختلف

طبقه‌بندی سرباره	حداقل شاخص ۷ روزه	حداقل شاخص ۲۸ روزه
رده ۸۰	-	۷۰
رده ۱۰۰	۷۰	۹۰
رده ۱۲۰	۹۰	۱۱۰

۲-۵-۳. ترکیب شیمیایی و مکانیسم هیدراتاسیون

سرباره کوره آهن‌گدازی، فراورده غیرفلزی است. ترکیب سرباره کوره آهن‌گدازی بلند بستگی به خلوص سنگ آهن مصرفی و ناخالصی‌های موجود در کک موجود در کوره بلند دارد. به‌طور معمول در سرباره حاصل از کوره بلند مقادیر سیلیس، کلسیم، آلومینیوم، منیزیم و اکسیژن بیش از ۹۵ است. برای فعالیت هیدرولیکی بهتر سرباره، ترکیب شیمیایی آن بسیار مهم است. از نظر شیمیایی، نسبت CaO/SiO_2 توسط کیناموبانزی^۳ و همکاران (۱۹۹۸) برای طبقه‌بندی سرباره‌ها به عنوان شاخص پایه ارائه شده است و این شیوه طبقه‌بندی را می‌توان ساده‌ترین شاخص برای ارزیابی فعالیت هیدرولیکی سرباره دانست. منابع علمی توصیه کرده‌اند مقدار این نسبت باید بیش از یک باشد و هر چقدر مقدار این نسبت بیشتر باشد، فعالیت هیدرولیکی آن در حضور فعال‌کننده‌های قلیایی بیشتر است (پال^۴ و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۴۸۶-۱۴۸۱). علاوه بر این، با ثابت نگه‌داشتن نسبت ذکر شده و افزایش محتوای (Al_2O_3) ، مقاومت سرباره افزایش یافته و کمبود (CaO) را می‌توان با مقدار بیشتری آلومین (MgO)

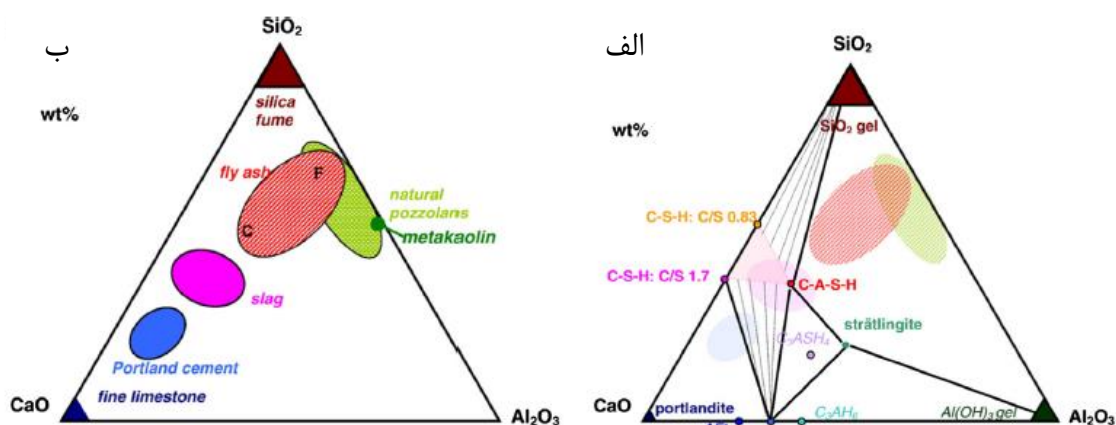
^۱. Wallah & Rangan

^۲. Gourley

^۳. Nkinamubanzi

^۴. Pal

جبران نمود. مطالعات نشان می‌دهد تغییرات (MgO) می‌تواند بر خواص سرباره تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، تفاوت در محتوای (MgO) تا حدود ۸ تا ۱۰ درصد ممکن است تأثیر جزئی بر روی مقاومت داشته باشد. اما تفاوت بیش از ۱۰ درصد (MgO) ممکن است تأثیر منفی داشته باشد (پال و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۴۸۶-۱۴۸۱). علاوه بر این، ذکر شد که فعالیت هیدرولیکی سرباره با افزایش محتوای کلسیم، آلومینیوم و اکسید منیزیم افزایش می‌یابد و با افزایش مقادیر (SiO_2) کاهش می‌یابد. طبق $EN 197-1$ و استانداردهای بریتانیا، نسبت مجموع جرم (CaO) و (MgO) به جرم (SiO_2) باید از ۱/۰ فراتر رود. این نسبت، قلیایی بودن بالایی را تضمین می‌کند که در غیر این صورت سرباره از نظر هیدرولیکی غیرفعال خواهد بود (اوزبای و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۳۳-۴۳۴؛ پال و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۴۸۱-۱۴۸۶) شیمی سرباره و فازهای توسعه یافته هیدراسیون در سیستم اکسید کلسیم - اکسید سیلیسیم - اکسید آلومینیوم در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است (لوتنباخ^۱ و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۲۵۶-۱۲۴۴). طبق مطالعات محققان، محصول اصلی هیدراتاسیون^۲ سرباره با آب و سیمان پرتلند، سیلیکات کلسیم هیدراته ($C-S-H$) است که در شکل ۲-۲ ب نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ الف) فازهای هیدرات در سیستم $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ ، ب) نمودار سه‌گانه $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ مواد سیمانی (لوتنباخ و همکاران، ۲۰۱۱)

۲-۶. تفاوت ساختار بتن معمولی و بتن فعال شده با قلیا

تفاوت اصلی ساختار بتن فعال شده با قلیا و بتن معمولی در شکل‌گیری خمیر چسباننده است. در ساختار بتن فعال شده با قلیا برای ایجاد خمیر چسباننده از ترکیب مواد آلومینوسیلیکاتی (مواد پایه) و فعال‌کننده قلیایی (ماده فعال‌ساز) استفاده می‌شود. در این نوع بتن چسباننده، از طریق فعل و انفعالات شیمیایی بین مواد پایه و ماده فعال‌کننده قلیایی به وجود می‌آید. بر اساس محتوای کلسیم موجود در مواد پایه آلومینوسیلیکات، مصالح فعال شده با قلیا را به سه گروه پرکلسیم، کم‌کلسیم و مخلوط‌های ترکیبی طبقه‌بندی نمود. همپنین مکانیسم فعال‌سازی در هر

¹. Lothenbach

². Hydration

گروه متفاوت است (شی^۱ و همکاران، ۲۰۱۱: ۷۶۳-۷۵۰). در ادامه به صورت هر گروه مورد بحث قرار گرفته شده است.

۲-۶-۱. مخلوط‌های پر کلسیم

سرپاره ($SiO_2 + CaO > 70\%$) متداول‌ترین مواد پایه غنی از کلسیم برای تشکیل سیمان قلیایی با کلسیم بالا است. و محصول اصلی واکنش، یک هیدرات کلسیم سیلیکات همراه با آلومینیوم (ژل $C-A-S-H$) است. که مشابه محصول اصلی تولید شده در طول هیدراتاسیون سیمان پرتلند ($C-S-H$) است. اما نسبت Ca/Si آن کمتر از سیمان پرتلند معمولی است. علاوه بر این، نوع و دوز فعال‌کننده‌ها، شرایط عمل‌آوری و ترکیبات سرپاره نیز تأثیر زیادی بر ساختار و ترکیب ژل ($C-A-S-H$) و محصولات ثانویه دارد (وانگ و نوگچی، ۲۰۲۰: ۱۱۹-۱۰۵).

اگرچه مکانیسم فعال‌سازی قلیایی سرپاره بسیار پیچیده است، اما به‌صورت کلی مراحل زیر در یک واکنش انجام می‌شود (وانگ و نوگچی، ۲۰۲۰: ۱۱۹-۱۰۵؛ بورسیاگا و اسکالانت-گارسیا^۲، ۲۰۱۳: ۳۹۴۸-۳۹۳۹):

الف- انحلال سیلیس و آلومینیوم موجود در مواد پایه در محلول فعال‌کننده قلیایی
ب- تشکیل ماده ژئوپلیمرها که شامل پیوندهای از نوع ($Si-O-Si$) و یا ($Si-O-Al$) می‌باشند (همان تشکیل ژل)

پ- تشکیل ژئوپلیمرهای سه بعدی آمورف یا همان تشکیل ساختار آلومینات سیلیکات سه‌بعدی
ت- اتصال ذرات جامد و واکنش نداده و مصالح پرکننده به ساختار ژئوپلیمر
در واقع وقتی ماده پایه در تماس با محلول قلیایی قرار می‌گیرد، حل شدن Si و Al شروع می‌شود. مقدار حل شدن به غلظت محلول قلیایی، کاتیون فلز قلیایی، سرعت هم زدن، مدت زمان حل شدن، ساختار و ترکیب مواد پایه بستگی دارد. در میان این عوامل، ویژگی‌های منبع آلومینوسیلیکاتی و غلظت محلول‌های قلیایی اهمیت بیشتری دارند. بعد از حل شدن ذرات آلومینوسیلیکاتی از سطح‌شان، جوانه ژل آغاز می‌شود و یون‌های Al و Si به داخل فاز ژل نفوذ می‌کنند.

۲-۶-۲. مخلوط‌های کم کلسیم

در مقایسه با مخلوط‌های غنی از کلسیم، تاریخچه توسعه سیستم کم کلسیم نسبتاً کوتاه‌تر بوده است و توسعه اولیه مخلوط‌های کم کلسیم توسط دانشمند فرانسوی (دیوبدویتس، ۱۹۹۴: ۱۴۹-۱۳۱) ایجاد شده است که در سال ۱۹۷۹ اصطلاح "ژئوپلیمر" را معرفی شدند. خاکستر بادی کلاسه F و متاکاولین دو ماده اولیه مورد استفاده برای مخلوط‌های فعال شده با قلیا (مخلوط‌های کم کلسیم) هستند محصولات مخلوط‌های بدون کلسیم یا کم کلسیم عمدتاً ژل‌های ژئولیت (مانند آنالسیت، سودالیت و غیره) هستند. و محصول اصلی یک پلیمر قلیایی معدنی سه بعدی ($Mn-(SiO_2)$) سودالیت و غیره) هستند. است که به عنوان ژل ($NASH$) شناخته شده است.

^۱. Shi

^۲. Burciaga-Díaz & Escalante-García

ژئوپلیمرها با توجه به نسبت سیلیکات و آلومینات به سه دسته اصلی به نام‌های پلی سیالیت (*PS*)، پلی سیالیت سیلوکسو (*PSS*) و پلی سیالیت دی سیلوکسو (*PSDS*)، تقسیم‌بندی می‌شوند. در این سه دسته، به ترتیب نسبت سیلیکات به آلومینات برابر ۱، ۲ و ۳ است (دیویدویتس، ۱۹۹۴: ۱۴۹-۱۳۱؛ کومری و کریون^۱، ۲۰۰۴: ۲۲۵-۲۱۱).

۲-۶-۳. مخلوط‌های ترکیبی

ترکیبی از دو نوع مخلوط فوق، توجه زیادی را هم در جامعه علمی و هم در صنعت به خود جلب کرده است. انتظار می‌رود از ترکیب مخلوط‌های پرکلسیم و مخلوط‌های کم‌کلسیم برای به دست آوردن استحکام مکانیکی و دوام عملکرد بهتری داشته باشد. هر چند در مقایسه با مخلوط‌های پرکلسیم و کم‌کلسیم، مطالعات روی این نوع مخلوط‌ها نسبتاً کم‌تر بوده است. از بررسی‌های شی و همکاران (۲۰۱۱) مشخص شد عملکرد این نوع مخلوط‌ها از نظر دوام مناسب بوده است. به‌طور کلی همزیستی و تعامل بین ژل‌های نوع (*CASH*) و (*NASH*) وجود دارد این حال، مکانیسم واکنش این مخلوط‌ها به دلیل همزیستی ژل‌های (*CASH*) و (*NASH*) بسیار پیچیده است. دو ژل معمولی می‌تواند به‌طور همزمان در یک سیستم تشکیل شوند. حضور کلسیم منجر به تشکیل ژل نوع (*CASH*) می‌شود و ساختار ژل (*NASH*) را تا حدودی از طریق جایگزینی بخشی از سدیم با کلسیم به ژل‌های (*CASH*) می‌شود، در حالی که افزایش در دسترس بودن آلومینات‌ها به شدت بر ترکیبات و ساختار (*CSH*) تاثیر می‌گذارد (گارسیا-لودریو و همکاران، ۲۰۱۱: ۹۳۱-۹۲۳؛ گارسیا-لودریو، ۲۰۱۳: ۱۲۲-۱۱۲). در تحقیقات انجام‌شده درباره ساختار محصول فعال‌سازی سرباره کوره آهنگدازی یک اجماع بر سر این موضوع وجود دارد که محصول اصلی این واکنش یک نوع ژل (*CASH*) با جایگزینی آلومینیوم با مقداری توبرموریت (سیلیکات کلسیم هیدراته) شبیه به نوع ساختار (*CSH*) است (وانگ و همکاران، ۱۹۹۵: ۱۰۲-۹۳؛ میرز^۲ و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۳۰۶-۵۲۹۴).

۲-۷. خواص بتن فعال شده با قلیا تازه و سخت شده

بتن فعال شده با قلیا، ترکیبی چسبنده و سفت با ویسکوزیته بالا و کارایی کم است. که نشان می‌دهد عوامل متعددی مانند نوع و ریزی مواد پایه و فعال‌ساز، مقدار فعال‌ساز و زمان اختلاط روی خمیر سیمان تازه فعال شده با قلیا، موثر است.

در فعال‌سازی سرباره مشاهده شده است که با افزایش غلظت فعال‌ساز قلیایی، کارایی کاهش می‌یابد. همچنین، در صورت افزایش سیلیکات سدیم میزان افت اسلامپ افزایش می‌یابد. به علاوه مدول سیلیکات نیز می‌تواند نقش مهمی در کارایی بتن داشته باشد. در صورتی که این مدول کمتر از ۰/۵ باشد، کارایی کم است و اگر بین ۰/۵ و ۱ باشد کارایی خیلی بالاتر است. همچنین، در صورتی که این مدول، بزرگ‌تر از یک باشد، با افزایش مدول کارایی به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد (وانگ و همکاران، ۱۹۹۵: ۱۰۲-۹۳).

¹. Comrie & Kriven

². Myers

مطالعات بوندار (۲۰۰۹) نشان داده که مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار روی خواص مکانیکی بتن‌های فعال‌شده با قلیا، مقدار نسبی Si ، Al ، K ، Na و نسبت مولی (Si/Al) در محلول، نوع ماده فعال‌ساز، مقدار آب و دمای عمل‌آوری است (سو و وان دونتر^۱، ۲۰۰۰: ۲۶۶-۲۴۷). اساساً وجود یون‌های سیلیکات در محلول قلیایی خواص مکانیکی و مدول الایسیسته بتن فعال‌شده با قلیا را بهبود می‌بخشد.

۲-۸. معایب بتن فعال‌شده با قلیا

در دهه‌های اخیر، مکانیزم هیدراسیون، محصولات واکنش، خواص مکانیکی به‌طور گسترده و دوام بتن‌های فعال‌شده با قلیا به‌صورت محدودتر مطالعه شده است. بتن ساخته‌شده با سرباره فعال نیز مانند بتن معمولی علی‌رغم تمام محاسن ذکرشده، دارای معایبی نیز است. پایین بودن مقاومت کششی (همانند بتن معمولی) و انقباض بالا و ایجاد شوره در سطح از نقطه ضعف‌های بالای این بتن محسوب می‌شود. لذا استفاده از این بتن‌ها رواج کمی در صنعت داشته است (مستالی^۲ و همکاران، ۲۰۱۸: ۵۵۰-۵۳۳؛ لی^۳ و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۱-۳۰). از آنجاکه در ژئوپلیمرها از ترکیبات قلیایی جهت فعال‌سازی استفاده می‌شود، لذا این نگرانی وجود دارد که دوام این بتن‌ها در معرض واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها ناچیز باشد. لذا ضروری است این موضوع مورد توجه قرار گیرد (ویسر، ۲۰۱۸: ۳۰-۱۸؛ پیگناتلی و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۱۰-۱۹۶).

۲-۹. واکنش قلیایی سنگدانه (AAR)

حفاظت از منابع طبیعی از طریق بادوام‌تر ساختن مصالح در هر حال یک اقدام زیست محیطی است. در حال حاضر، عموماً پذیرفته شده است که در طراحی سازه‌ها، باید مشخصات دوام مصالح مورد نظر، همانند سایر مشخصات و ویژگی‌های آن، نظیر خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار گیرد. بتن بادوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت‌دهی خود را در شرایط محیطی حفظ کند. در واقع رابطه نزدیکی بین دوام مصالح و شرایط محیطی وجود دارد (آدام نوئل، ۱۳۹۰؛ ترجمه رمضانپور و شاه نظری). بتن به دلیل مزایایی که دارد به‌طور وسیع در سراسر جهان استفاده می‌شود و با توجه به اهمیت ویژه‌ای که دارد، عوامل مخرب و تأثیرگذار بر روی آن نیز مورد اهمیت هستند. کیفیت بتن بستگی به کیفیت اجزای اصلی و نیز مهارت در ساختن، ریختن و عمل‌آوری آن دارد. بتن نیز مانند سایر مواد در معرض خطرات و تخریب‌های فراوانی است. امروزه غالب فرآیندهای مختلف تأثیرگذار بر بتن شناسایی شده و یکی از مهم‌ترین و اثرگذارترین آن‌ها که اثر تخریبی قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد دراز مدت بتن دارد، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها است. در گذشته عقیده بر این بود، که سنگدانه‌های مصرفی در بتن، جزئی خنثی و از نظر شیمیایی پایدارند. اما از دهه ۱۹۴۰، به تدریج معلوم شد که برخی از مواد واکنش‌پذیر در سنگدانه (سیلیس و کربنات‌های دولومیتی) که در

¹. Xu & Van Deventer

². Mastali

³. Li

مجاورت رطوبت بالا قرار گرفته‌اند، با قلیایی سیمان واکنش مضر ایجاد می‌کنند که باعث به وجود آمدن مشکلات جدی می‌شود (استانتون^۱، ۱۹۴۲: ۸۴-۵۴). این واکنش، سبب انبساط زیان‌آور، ترک خوردگی و خرابی بتن می‌شود. به این واکنش، واکنش قلیایی سنگدانه (AAR) گفته می‌شود. در حال حاضر دو نوع عام واکنش قلیایی مربوط به سنگدانه‌ها با عنوان واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها و واکنش قلیایی کربناتی سنگدانه‌ها شناسایی شده است. برخی از محققین بر این باورند که تفکیکی میان واکنش قلیایی سیلیسی و قلیایی کربناتی وجود ندارد لیکن بیشتر محققین در این زمینه، این دو واکنش را از یکدیگر مستقل می‌دانند. این واکنش‌ها از لحاظ عناصر واکنش‌دهنده تفاوت‌هایی دارند که شامل واکنش‌هایی با فاز سیلیکات یا کربنات در مصالح می‌باشند. براساس مقالات و گزارش‌های موجود در خصوص واکنش‌های قلیایی، تعداد مشاهدات وقوع واکنش قلیایی سیلیسی نسبت به واکنش قلیایی کربناتی به میزان قابل توجهی بیشتر است. لذا تحقیقات بسیار گسترده‌ای در خصوص کنترل واکنش قلیایی سیلیسی صورت گرفته، ولی در خصوص کنترل واکنش قلیایی کربناتی مطالب کم‌تری یافت می‌شود (گراتان^۲ و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۶۲-۵۵۶؛ فلدمان و سردا^۳، ۱۹۶۱: ۲۰۳-۱۴).

۲-۹-۱. واکنش قلیایی کربناتی (ACR)

واکنش قلیایی کربناتی یک واکنش شیمیایی در بتن یا ملات بین یون‌های هیدروکسید (OH^-) و با حضور سدیم و پتاسیم موجود در سیمان و یا منابع دیگر با برخی عناصر کربناتی نظیر دولوستون کلسیتیک و سنگ آهک‌های دولومیتی موجود در برخی از سنگدانه‌ها مانند دولومیتی بستنتی رسی، سنگ آهک‌های دولومیتی رسی، سنگ‌های رسی کوارتزار و سنگ‌های دولومیتی بستنتی است. این واکنش معمولاً همراه با انبساط ذرات کربنی سنگدانه همراه بوده و منجر به انبساط غیرطبیعی و ترک خوردگی بتن در حالت سرویس‌دهی می‌شود. در سازه‌های متأثر از این واکنش، ترک خوردگی در عرض پنج سال از عمر بهره‌برداری مشاهده می‌شود. تجزیه دولومیت ناشی از واکنش بین کربنات کلسیم و منیزیم، با یک محلول قلیایی باعث تشکیل بروسیت $Mg(OH)_2$ و احیای مجدد یون هیدروکسید قلیایی می‌شود. تجزیه دولومیتی، ژل منبسط شونده را ایجاد نمی‌کند. انبساط مشاهده شده گاهی اوقات وابسته به مواد رسی در لایه‌های معدنی و یا شامل کربنات‌های کریستالی است. این رس‌ها سبب فساد بتن در اثر جذب یون‌های (OH^-) می‌شوند (گیلوت و اسونسون^۴، ۱۹۶۹: ۲۳-۷).

¹. Stanton

². Grattan

³. Feldman & Sereda

⁴. Gillott & Swenson

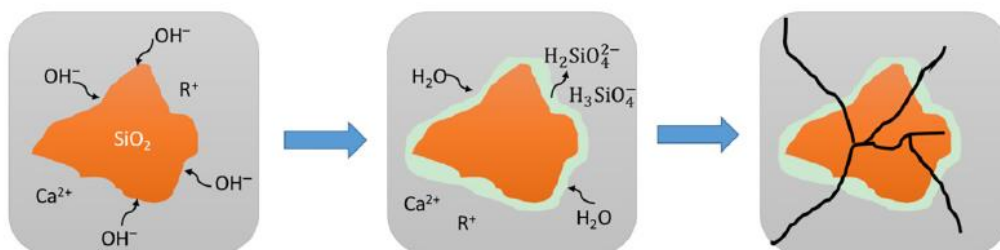
۲-۹-۲. واکنش قلیایی سیلیسی (ASR)

نوع بیشتر شناخته شده‌ی این واکنش‌ها، که به واکنش قلیایی سیلیسی مشهور است، به دلیل واکنش شیمیایی بین برخی مواد معدنی سیلیسی مانند اوپال، کریستوبولیت، چرت، کوارتز میکروکریستالی و شیشه آتشفشانی اسیدی موجود در برخی مصالح و یون‌های هیدروکسید (OH^-) همراه با قلیایی‌های سیمان (سدیم و پتاسیم) به وجود می‌آید. این واکنش‌ها منجر به نیروهای گسترده داخلی در بتن و ایجاد انبساط می‌شوند که باعث ترک خوردگی نه چندان زودرس، سطح ظاهری نامطلوب، و کاهش مقاومت و کارایی سازه‌های آسیب دیده شده و به کاهش عمر آن می‌انجامند. ترک خوردگی حاصل می‌تواند سایر فرایندهای فرسایش بتن مانند آسیب‌های مربوط به سیکل ذوب و یخ و همچنین خوردگی آرماتورهای بتن مسلح را نیز تسریع کند؛ به‌ویژه در سازه‌هایی که در معرض حمله کلرایدها خصوصاً در نوار ساحلی قرار دارند. واکنش‌های قلیایی سیلیسی به‌عنوان یکی از دلایل اصلی ترک خوردگی و سایر مشکلات مربوط به دوام در سراسر جهان، به‌ویژه در مناطق دارای شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب شناخته شده و آسیب‌های مرتبط با این واکنش‌ها در سازه‌های مختلف از جمله ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها، و نیروگاه‌ها مشاهده شده است. برای توسعه‌ی واکنش‌های قلیایی سیلیکاتی، سنگدانه‌ها باید خاصیت سیلیسی و خمیر سیمانی خاصیت قلیایی کافی داشته باشند. حضور عواملی از جمله قلیائیت بالای سیمان، وجود انواع مشخصی از سنگدانه‌های سیلیسی، حضور رطوبت در محیط و شرایط آب و هوایی مرطوب، در معرض فضای باز بودن نمونه بتنی و نظایر آن می‌تواند به شدت، وقوع واکنش قلیایی سیلیسی را تقویت نماید. بنابراین خطر این واکنش‌ها در ابتدا به مصالح مورد استفاده در بتن و در مرحله بعد به شرایط آب و هوایی حاکم بر منطقه وابسته است (استانتون، ۱۹۴۲: ۸۴-۵۴). نخستین مشاهدات مربوط به خرابی بتن بر اثر واکنش‌های قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها در دهه ۱۹۳۰ توسط استانتون در ایالت کالیفرنیا مشاهده و در سال ۱۹۴۰ منتشر شد. مطالعات استانتون نشان داد میزان قلیائیت سیمان، نوع و میزان واکنش‌پذیر بودن سنگدانه‌ها، رطوبت و دمای هوا از جمله عوامل تاثیرگذار بر انجام و پیشرفت واکنش‌های قلیایی سیلیکاتی هستند. مشاهدات بعدی وی نشان داد با حضور کمتر از ۰/۶ درصد قلیائیت در سیمان، رخداد واکنش قلیایی سیلیکاتی قابل چشم پوشی است (استانتون، ۱۹۴۲: ۸۴-۵۴). با توجه به سال‌های طولانی تحقیق بر روی واکنش‌های قلیایی سیلیکاتی، امروزه روش‌های گسترده‌ای برای شناسایی مصالح واکنش‌پذیر و اقداماتی برای محدود کردن خطر آسیب‌های ناشی از این واکنش در ساخت و سازه‌های بتنی جدید وجود دارد. به عنوان نمونه، برای تشخیص پتانسیل رخداد خرابی‌های ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی می‌توان از آزمایش‌هایی نظیر *ASTM C1260* (۲۰۰۳)، *ASTM C1293* (۲۰۰۸)، آزمایش‌های پتروگرافی (*ASTM*، ۲۰۰۳) و نیز استفاده از شاخص کمی خرابی و غیره استفاده نمود. هر دو آزمایش *ASTM C1260* و *ASTM C1293* به ترتیب مبتنی بر اندازه‌گیری انبساط ملات و بتن در اثر واکنش‌های قلیایی سیلیسی است. آزمایش *ASTM C1260* یک آزمایش تسریع یافته بر روی ملات‌های منشوری به‌منظور تعیین واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها بوده که در آن نمونه‌ها در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و به صورت مستغرق در محلول یک نرمال هیدروکسید سدیم

به مدت دو هفته نگهداری شده و انبساط آن‌ها مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. با توجه به شرایط شدید نگهداری‌ها نمونه در این آزمایش و امکان وجود برخی عوامل واکنش‌پذیر در مصالح سنگی درشت‌دانه، نتایج این آزمایش تنها برای شناسایی مقدماتی مناسب بوده و جهت ارائه نظر قطعی در مورد واکنش‌پذیری یک ترکیب، قابل‌اعتماد نیست.

۲-۹-۳. مکانیزم واکنش قلیایی سیلیسی

واکنش قلیایی سیلیسی بین یون هیدروکسید موجود در سیمان و سنگدانه‌های سیلیسی اتفاق می‌افتد و در نتیجه آن، یک ژل سیلیکاتی که قابلیت انبساط داشته تشکیل و موجب ترک و انبساط در بتن می‌شود، تشکیل می‌شود. با ادامه این واکنش، ترک‌ها گسترش یافته و با کاهش مقاومت بتن مواجه می‌شویم (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ مکانیزم ترک خوردگی ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن (عبدالرحمان^۱ و همکاران، ۲۰۱۵)

فرایند واکنش به این صورت است که یون‌های هیدروکسید (OH^-) موجود در پرتلندایت^۲ با سیلیس واقع در سطح سنگ‌دانه تماس پیدا کرده و واکنش می‌دهند. در واقع یون هیدروکسید با اتم اکسیژن انتهایی واقع در ساختار سیلیس، واکنش می‌دهد. این واکنش باعث از هم پاشیدگی و جدا شدن گروه‌های سیلیس از هم می‌شود (شکل ۲-۳). البته این واکنش به نوع شبکه‌ی سیلیس، یعنی کریستالی یا آمورف بودن نیز وابسته است.

در سیلیس با ساختار کریستالی و منظم، یون هیدروکسید با اکسیژن‌های انتهایی واکنش می‌دهد، اما نمی‌تواند شبکه‌ی سیلیس را از هم بپاشد و تنها مقداری از اکسیژن‌های انتهایی آن را مصرف می‌کند. در نقطه مقابل سیلیس کریستالی، سیلیس با ساختار آمورف بوده که این نوع نسبت به واکنش بین یون هیدروکسید و اتم‌های اکسیژن بسیار حساس بوده و ساختارش را از دست می‌دهد. از هم پاشیدگی ساختار سیلیس به پیشرفت واکنش کمک کرده و با گذشت زمان میزان ژل بیش‌تری تولید می‌کند (فنگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۰۱-۹۴؛ ساه^۴ و همکاران، ۲۰۱۸: ۷۵۸-۷۴۳). در صورتی که سنگدانه‌های استفاده‌شده در بتن حاوی سیلیس آمورف (سیلیکات شیشه‌ای یا اپال)،

¹. Abdelrahman

². Portlandite

³. Feng

⁴. Saha

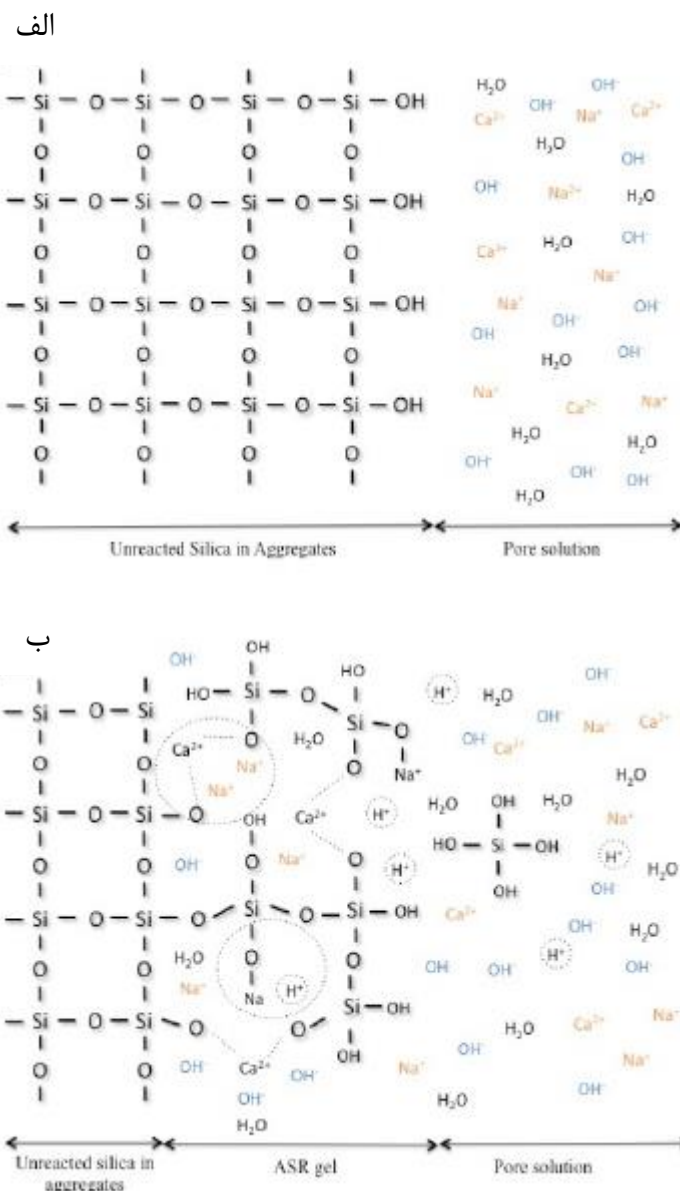
کریستال‌های ناپایدار پلیمری (کریستویت و ترامایت)، کریستال‌های ضعیف از سیلیس، و میکروکریستال‌های سنگ کورتسروینک باشند، حتماً باید به رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی توجه جدی شود (بلسزینسکی و توماس^۱، ۱۹۹۸: ۷۸-۶۶؛ بکتاس^۲ و همکاران، ۲۰۰۸).

بر اساس واکنش قلیایی سیلیسی رخ داده، ساختار سیلیس از گروه‌های تکرار شونده‌ای نظیر $(Si-O-Si)$ تشکیل شده و در این ساختار، تعدادی از اتم‌های اکسیژن که تمامی ظرفیت آنها مصرف نشده در انتهای شبکه قرار گرفته (مطابق با تصویر ۲-۴)، سیلیس در آب بسیار ناپایدار و واکنش‌پذیر است و به محض تماس با آن، واکنش می‌دهد. نتیجه‌ی این واکنش این است که اتم‌های اکسیژن با مولکول‌های آب واکنش داده و گروه‌های $(Si-OH)$ را تشکیل می‌دهند (معادله ۱) (رجب پور و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۴۶-۱۳۰).

اولین مرحله واکنش شامل جابه‌جایی یک یون تک ظرفیتی (H^+) با یک یون تک ظرفیتی دیگر (K^+, Na^+) است، که اصطلاحاً به آن تبادل یونی می‌گویند (معادله ۲)، مرحله دو واکنش تبادل یونی، شامل جایگزینی دو یون تک ظرفیتی (K^+, Na^+) با یک یون دو ظرفیتی (Ca^{2+}) است. جایگزینی قلیاها با کلسیم به عنوان بازیابی قلیایی شناخته می‌شود (معادله ۳) (رجب پور و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۴۶-۱۳۰) و در بخش ۲-۹-۶ توضیح داده خواهد شد. در نتیجه‌ی این واکنش‌های متوالی، یک هیدروژل قلیایی - قلیایی خاکی - سیلیسی، تولید می‌شود که ژل واکنش قلیایی سیلیسی نامیده می‌شود. فرمول شیمیایی کلی ژل واکنش قلیایی سیلیسی را می‌توان به صورت $(C-N-)$ نمایش داد، که N نماد اکسید قلیایی‌ها است. با گذشت زمان، ژل حاصل از واکنش سیلیس قلیایی قادر به تولید فشاری بیش از مقاومت کششی بتن بوده اما باید توجه داشت که این روند کند بوده و غالباً علائم آن بعد از چند دهه در سازه نمایان شود (قلیزاده-وایقان و رجب پور، ۲۰۱۷: ۵۸-۴۹).

¹. Bleszynski & Thomas

². Bektas



شکل ۲-۴ نمایش دو بعدی کنش بین سیلیس موجود سنگدانه‌ها و محلول منفذی بتن (الف) قبل از انجام واکنش قلیایی سیلیسی (ب) پس از انجام واکنش قلیایی سیلیسی (مکانیسم‌های تبادل یونی در داخل حلقه‌ها نشان داده شده است (قلیازده - وایقان و رجب پور، ۲۰۱۷).

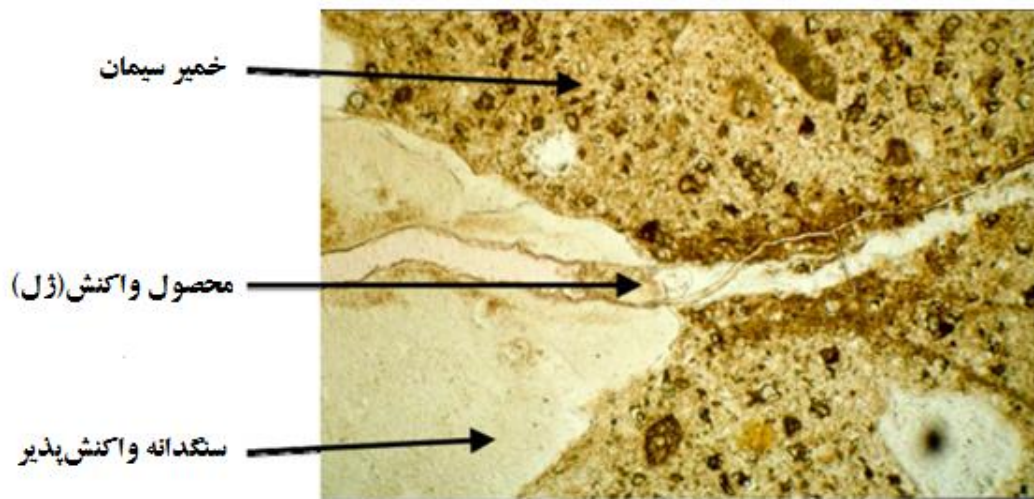
جدول ۲-۲ خلاصه مراحل ASR و معادلات شیمیایی آن‌ها

واکنش	معادله شیمیایی	معادله
دپلمریزاسیون سیلیس	$(SiO_2)_s + 2H_2O \longrightarrow Si(OH)_4(aq)$	۱
تبادل یونی	$Na^+ + (Si(OH)_4)_{aq} \longrightarrow ((OH)_3SiONa)_{aq} + H^+$	۲
بازیابی قلیایی	$2((OH)_3SiONa)_{aq} + Ca^{2+} \longrightarrow (OH)_3SiO - Ca - OSi(OH)_3 + 2Na^+$	۳
انحلال پرتلندایت	$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$	۴

۲-۹-۴. ژل واکنش قلیایی سیلیسی

محصول این واکنش شیمیایی (واکنش قلیایی سیلیسی)، تولید یک ژل سیلیکاتی است که از آن به عنوان ژل واکنش قلیایی سیلیسی یاد می‌شود، در واقع خود ژل زیان‌آور نبوده بلکه این ژل، آب را جذب نموده و متعاقباً انبساط پیدا می‌شود و این آغاز تخریب است. حال اگر این ژل، داخل فضاها و ترک‌های موجود در بتن رسوخ کند، با تخریب مواجه نیست، اما چنانچه فضای کافی نباشد، یا به عبارتی تمام فضاها قبلاً اشغال شده باشد، انبساط بیشتر این ژل تنش‌های داخلی در ماتریس سیمانی تولید کرده که موجب توسعه ترک‌های شعاعی در اطراف سنگدانه می‌شود. افزایش حجم ژل به دلیل آب دوست بودن ژل بوده که باعث می‌شود ژل، آب‌های اطراف خود را جذب کرده و افزایش حجم زیادی پیدا کند. ضمناً پیشرفت واکنش وابسته به حضور رطوبت و جذب آن توسط ژل است. با ایزوله کردن و منع بتن از جذب آب و رطوبت، رطوبت کافی برای انبساط مخرب در اختیار ژل قرار نگرفته و نمی‌تواند اثر مخربی ایجاد نماید. در واقع وجود عامل رطوبت برای واکنش لازم و ضروری است. به همین دلیل است که پدیده‌ی واکنش قلیایی سیلیسی در ساختمان‌های عادی چندان رایج نبوده و اکثراً در سازه‌های حجیم همانند پل، رویه‌ی بتنی، سدها و نیروگاه‌ها بسیار شایع است (استراک^۱، ۱۹۹۱؛ سوآمی^۲، ۲۰۰۲).

در تصویر ۲-۵، ریزساختار معمولی از آسیب واکنش قلیایی سیلیسی در بتن با سیمان پرتلند معمولی در نمایش داده شده است.



شکل ۲-۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن با سیمان پرتلند معمولی (سوآمی، ۲۰۰۲)

^۱. Stark
^۲. Swamy

۲-۹-۴-۱. ترکیبات ژل قلیایی سیلیسی

ترکیبات شیمیایی ژل قلیایی سیلیسی به تخلخل، اندازه ذرات، درجه تبلور در سنگدانه‌ها و محل تشکیل ژل، بستگی دارد. ترکیبات شیمیایی ژل، عمدتاً حاوی سیلیس، کلسیم، پتاسیم و سدیم است. نسبت (Ca/Si) تأثیرات متفاوتی بر روی تورم ژل واکنش قلیایی سیلیسی داشته است و به‌طور کلی، افزایش قلیایت ژل $(K/Si, Na/Si)$ و مقدار نسبتاً زیاد (Ca/Si) ، منجر به بیش‌ترین مقدار تورم ژل واکنش قلیایی سیلیسی می‌شود. ترکیب ژل واکنش قلیایی سیلیسی نقش مهمی در آسیب‌های مخرب ناشی از انبساط دارد. مشاهده شده است که ژل‌های دارای (CaO/Na_2O_{eq}) زیاد، تورم کم‌تری نسبت به ژل با (CaO/Na_2O_{eq}) کم، دارند. البته شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد که تشکیل ژل ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی همیشه به صدمه بتن، تبدیل نمی‌گردد و برخی از ژل‌ها از نظر تورم بی‌ضرر هستند (قلیزاده-وایقان و رجب زاده، ۲۰۱۷: ۴۹-۵۸؛ تاولو^۱ و همکاران، ۱۹۹۶: ۳۰۹-۳۱۸؛ عباس و همکاران، ۲۰۱۷: ۶۱-۷۰)

۲-۹-۴-۲. مقدار فشار تولیدشده توسط ژل

در سال ۱۹۹۷ فراریز و همکاران (فراریس^۲ و همکاران، ۱۹۹۷) آزمایشی برای اندازه‌گیری فشار تولیدشده توسط ژل در منشور بتنی حاوی سنگدانه‌های واکنش‌پذیر ابداع کردند. در این منشور بتنی، تغییر شکل بتن محدود بوده و این محدودیت منجر به محاسبه نیروی تولیدشده می‌شود. به عبارتی در این روش، اثر سازه‌ای لحاظ شده است. خمیر سیمان موجود بین سنگدانه‌ها می‌تواند این محدودیت را ایجاد کند. لذا هرچه مقاومت خمیر سیمان بیشتر باشد قید بیشتری خواهیم داشت. بنابراین طرح مخلوط بتن، تعیین می‌کند که مکانیزم واکنش قلیایی سیلیسی چگونه پیش رود.

ممکن است ژل داخل سنگدانه‌ها نفوذ کند و منجر به بروز ترک در سنگدانه شود، البته اگر نیروی ناشی از انبساط، بزرگ‌تر از مقاومت سنگدانه باشد. چنین اتفاق مشابهی عیناً برای مقاومت ناحیه اتصال سنگدانه - سیمان و مقاومت خمیر سیمان رخ می‌دهد.

به طرز مشابه، ژل می‌تواند داخل ترک‌های ناحیه اتصال سنگدانه - سیمان و خمیر سیمان هم نفوذ کرده، متورم شده و در صورت غلبه نیروی ناشی از انبساط بر مقاومت ناحیه اتصال یا خمیر سیمان، ترک‌ها را گسترش دهد. اما در تمام این موارد باید توجه داشت که اگر سنگدانه، ناحیه اتصال و خمیر سیمان به نحوی محدود و مقید شده باشد و نتواند فضای کافی برای انبساط ژل باز کند، حتی ممکن است فرآیند واکنش قلیایی سیلیسی متوقف گردد. پس فشار تولیدشده توسط ژل یک پارامتر تعیین‌کننده برای توجیه و مدل‌سازی مکانیزم آسیب بتن ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی است. در ضمن مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی واکنش قلیایی سیلیسی در ادبیات پیشین وجود دارد (نمونه‌هایی دو یا سه بعدی در مقیاس‌های ماکرو یا مزو).

¹. Thaulow

². Ferraris

آزمایش‌ها و استانداردهای مختلفی برای اندازه‌گیری مقدار تورم ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن یا خمیر سیمان وجود دارد (مثل *CPT* و *UMBT*). این آزمایش‌ها صرفاً بیان می‌کنند که چنانچه مقدار انبساط از حد مجاز کمتر باشد خطر حمله واکنش قلیایی سیلیسی در سازه بتنی منتفی است و دیگر هیچ اطلاعاتی در خصوص اینکه چه مکانیزمی رخ می‌دهد و یا اینکه واکنش قلیایی سیلیسی در یک سازه که درجات آزادی آن محدود شده باشد، چگونه خواهد بود، نمی‌دهد (سو و همکاران، ۲۰۰۲).

در تحقیقات انجام‌شده توسط (شلانگن و کوپوراوولو^۱، ۲۰۰۷: ۱۸۴۱-۱۸۳۵) با هدف اندازه‌گیری مقدار انبساط ژل در واکنش قلیایی سیلیسی، مکانیزم این واکنش، به دو روش تجربی و عددی بررسی شد. برای مدل‌سازی انبساط ژل، از یک مدل مکانیکی در مقیاس مزو و بر پایه تئوری شبکه (*Lattice theory*) استفاده شد. این مدل قادر است مکانیزم آسیب بتن ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی را مدل‌سازی کند. یکی از داده‌های مهم و اصلی برای مدل‌سازی، مقدار انبساط ژل و در نتیجه نیروهای داخلی منتج از این انبساط است. بدین منظور، یک دستگاه برای اندازه‌گیری فشار ناشی از انبساط در مقیاس میکرو تهیه شد تا فشار موضعی ایجاد شده در هر سنگدانه را بتوان مدل کرد.

۲-۹-۵. نقش کلسیم در واکنش قلیایی سیلیسی

در مکانیزم تبادل یونی کلسیم (بازیابی قلیایی) تک یون کلسیم جایگزین دو یون سدیم یا پتاسیم می‌شود. در واقع مقداری از قلیایی‌ها با کلسیم موجود در بتن جابجا می‌شود. نتیجه‌ی این مکانیزم حفظ قلیایت (قلیائیت بیشتر) محلول منافذی بتن از طریق آزاد شدن عناصر قلیایی (سدیم یا پتاسیم) است (رجب پور و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۴۶-۱۳۰).

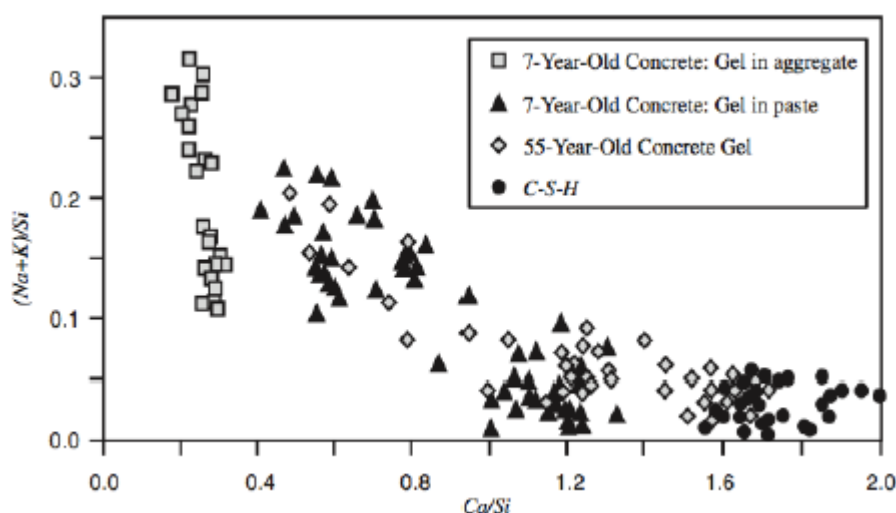
قلی‌زاده-وایقان و همکاران (۲۰۱۶) پیشنهاد کردند، که باید برای ایجاد انبساط مخرب ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی، غلظت مطلوب یا بهینه از کلسیم در ژل علاوه بر دیگر عوامل (سیلیس فعال، قلیایی و رطوبت) موجود باشد و به این نتیجه رسیدند که با کلسیم بسیار کم، سیلیکات‌ها بدون منبسط شدن در منافذ محلولی حل می‌شوند، درحالی‌که کلسیم بیش از حد منجر به ژل غیر متورم می‌شود.

بسیاری از محققین اشاره کرده‌اند که حضور کلسیم هیدروکسید $Ca(OH)_2$ و یا منابع قابل حل کلسیم برای تشکیل ژل منبسط شونده و مخرب واکنش قلیایی سیلیسی ضروری است. به عبارت دیگر، این منبع برای شروع و پیشرفت واکنش و هم‌چنین داشتن قدرت تخریب‌کنندگی بالا، لازم و ضروری است. در کنار داشتن خواص تورم و جذب آب، ژل با افزایش مقدار کلسیم خواص رئولوژیکی (تنش تسلیم و ویسکوزیته) بهبود پیدا کرده و می‌تواند تنش و ترک داخلی بیش‌تری ایجاد نماید (لیمان^۲ و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۲۴۹-۱۲۴۳؛ شفاعتیان و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۵۳-۱۴۳). در طرف مقابل، بسیاری از محققین اعلام داشته‌اند که وجود کلسیم برای ژل ضروری نیست و ژل حاوی مقدار کافی

^۱. Schlangen & Copuroglu

^۲. Leemann

کلسیم، رفتار و تورم مخربی نداشته، که کاملاً مخالف اظهار نظر محققین قبلی است (کیم^۱ و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۶-۴۵؛ مراغه چی و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۳-۱). توماس^۲ (۲۰۰۱: ۲۳۶-۲۲۵) نشان داد که جایگزین شدن کلسیم و آزاد شدن قلیایی آزاد باعث می‌شود ژل قدیمی واکنش قلیایی سیلیسی از نظر ترکیب به مشابه (C-S-H) که محصول هیدراتاسیون سیمان است تبدیل شود (شکل ۲-۶). نتایج کریونکو^۳ و همکاران (۲۰۱۴: ۱۶۵-۱۵۷) نشان داد، زمانی که کلسیم به غلظت بهینه رسیده باشد، تورم ژل ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی می‌تواند تنشی داخلی به میزان ۲۰ مگاپاسگال، اعمال کند. این روند باعث ایجاد ترک در داخل سنگدانه و انتشار آن در سراسر مخلوط سیمانی شده و منجر به نمایان شدن ترک‌های نقشه‌ای داخل سازه می‌شود. استرویل و دیاموند^۴ (۱۹۸۱) و بلژینسکی و توماس (۱۹۹۸) گزارش کردند که ژل‌های بدون کلسیم همچون مایع روان بدون ایجاد فشار حرکت می‌کنند (ویسکوزیته‌ی خود را از دست داده‌اند)، که نشانگر ویسکوزیته و فشار تورم کم آن‌ها است. در حالی که وجود مقدار زیاد کلسیم در ژل باعث افزایش ویسکوزیته و حالت جامد آن می‌شود.



شکل ۲-۶ تغییر در ترکیب ژل ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی (کیم و همکاران، ۲۰۱۵): با گذشت زمان ژل تمایل به ترکیب کلسیم، آزادسازی قلیاها و رویکردهایی به ترکیب (C-S-H) دارد.

۲-۹-۶. نقش آلومینیوم در واکنش سیلیس قلیایی

برخی مطالعات نشان می‌دهد که حضور آلومینیوم در منافذ محلولی بتن خطر ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی را کاهش می‌دهد. جذب آلومینیوم در سطوح سیلیس و یا تشکیل یک لایه‌ی محافظ از جنس سیلیس - آلومینیوم، میزان تجزیه سنگدانه‌ها را کاهش داده (اوکا و توموزاوا^۵، ۱۹۸۰: ۵۴۳-

¹. Kim

². Thomas

³. Krivenko

⁴. Struble & Diamond

⁵. Oka & Tomozawa

۵۳۵؛ ایلر^۱، ۱۹۷۳: ۴۰۸-۳۹۹) و ترکیب و ساختار ژل سیلیکات تولید شده را تغییر می‌دهد (چاپکس و اسکریونر^۲، ۲۰۱۳: ۵۹۷-۵۹۲؛ چاپکس و اسکریونر، ۲۰۱۳: ۵۹۷-۵۹۲). علاوه بر این، قابلیت یون آلومینیوم در افزایش ظرفیت پیوند قلیایی در محصولات C-S-H که ممکن است قلیائیت منافذ محلولی را کاهش دهد، به طرز قابل توجهی ظرفیت جذب قلیایی آن را افزایش می‌دهد (هانگ و گلاسر^۳، ۲۰۰۲: ۱۱۱۱-۱۱۰۱). به طور کلی آلومینیم براساس سه مکانیزم زیر، نقش مهمی در کاهش تجزیه سنگدانه‌ها دارد: الف- جذب شیمیایی آلومینیوم توسط سیلیس محلول ب- تشکیل یک لایه محافظ زئولیت ج- اتصال قلیایی تاثیر مثبت آلومینیوم را در کاهش از هم پاشیدگی را به طور برجسته نشان می‌کند. به این ترتیب، آلومینیوم محلول در محلول منافذ بتن ممکن است به عنوان ابزاری برای کاهش واکنش قلیایی سیلیسی در نظر گرفته شود (مورائس نوس^۴، ۲۰۱۶).

۲-۱۰. واکنش قلیایی سیلیسی (ASR) در بتن‌های فعال شده با مواد قلیایی (AAC)

مطالعات بیشتری در مورد مکانیسم واکنش قلیایی سیلیسی و کنترل و کاهش رخ دادن آن در بتن ساخته شده با سیمان معمولی نسبت به بتن‌های فعال شده با مواد قلیایی، انجام شده است. با توجه به لزوم وجود قلیائیت بالا در بتن‌های فعال شده با مواد قلیایی، این نگرانی وجود دارد که پتاسیل رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی در این بتن‌ها بیشتر باشد. تعدادی از محققین به بررسی واکنش قلیایی سیلیسی در بتن‌های فعال شده با مواد قلیایی پرداخته‌اند. اما نیاز به مطالعات بیشتری در این زمینه است. بررسی آسیب‌های مخرب ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط‌های فعال شده با قلیا تحت تأثیر عوامل متعددی مانند ماهیت و میزان فعال‌کننده‌ها، مواد پایه، سنگدانه‌های واکنش‌پذیر و روش‌های آزمایش قرار دارد. برای درک بهتر از رفتار مخلوط‌های فعال شده با مواد قلیایی، باید ترکیبی از چندین عامل مانند مدول سیلیکات و محتوای قلیایی در نظر گرفته شود (وانگ و نوگاجی، ۲۰۲۰: ۱۱۹-۱۰۵).

کریونکو و همکاران (۲۰۱۴) با توجه به مکانیسم واکنش قلیایی سنگدانه پیشنهاد کردند که سنگدانه‌های واکنش‌پذیر می‌توانند در بتن فعال شده با قلیا بدون هیچ‌گونه خطری در زمینه واکنش قلیایی سنگدانه مورد استفاده قرار گیرند. اما مطالعات برخی از محققان نشان می‌دهد (پوئرتاس^۵ و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۸۴-۲۷۷؛ یانگ و همکاران، ۱۹۹۹: ۶۵۷-۶۵۱) که واکنش قلیایی سنگدانه در بتن فعال شده با قلیا وجود دارد اما شدت آن از بتن‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی کمتر است. تالینگ و براندستتر^۶ (۱۹۸۹) اظهار داشتند که امکان وجود واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های سرباره فعال وجود ندارد، زیرا بیش از ۸۰ درصد قلیاها در محصولات مختلف هیدراسیون استفاده شده‌اند. اما پوئرتاس و همکاران (۲۰۰۹) وقوع واکنش قلیایی سیلیسی در بتن سرباره‌ای فعال شده با

¹. Iler

². Chappex & Scrivener

³. Hong & Glasser

⁴. Moraes Neves

⁵. Puertas

⁶. Talling & Brandstetr

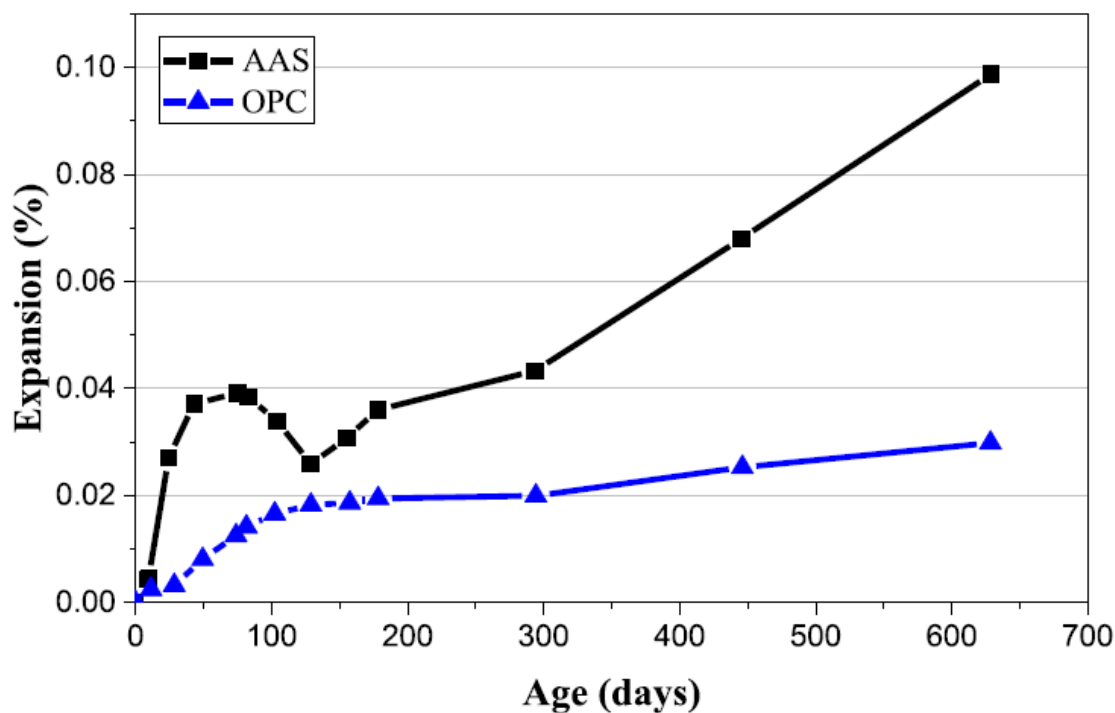
مواد قلیایی و حاوی سنگدانه سیلیسی واکنش‌پذیر را تأیید کرد. بررسی‌های وانگ و همکاران (۱۹۹۴) نشان داد که دوام بتن سرباره‌ای فعال شده با قلیا تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی بیشتر است، زیرا ۸۰ درصد محصولات هیدراسیون ناشی از فعال‌سازی با قلیا در طول یک‌سال تولید می‌شود. علاوه بر این، گراسیا - لودیو و همکاران (۲۰۰۷) دریافت که در ملات‌های ساخته‌شده از خاکستر بادی فعال‌شده با قلیا، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در مقایسه با ملات معمولی (ساخته شده از سیمان پرتلند) تحت آزمایش استاندارد ۱۲۶۰ ناچیز است و نیز ثابت کردند کلسیم نقش حیاتی در فرایند انبساط ژل واکنش سیلیس قلیایی بازی می‌کند. و برعکس باخارف و همکاران (۲۰۰۱) دریافت که بتن سرباره‌ای فعال‌شده با قلیا انبساط بیشتری در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی تحت روش آزمایش بلندمدت استاندارد ۱۲۹۳ دارد. در نتیجه مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی در برابر واکنش قلیایی سیلیسی بیشتر آسیب‌پذیر هستند.

گیفورد و گیلوت^۱ (۱۹۹۶) دریافتند که بتن سرباره‌ای فعال‌شده با قلیا در مقایسه با بتن مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی به میزان بیشتری مستعد انبساط واکنش کربناتی سنگدانه (ACR) و به میزان کمتری مستعد انبساط واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه (ASR) است. به عبارت دیگر این محققین نشان دادند، انبساط ناشی از واکنش کربناتی سنگدانه (ACR) در بتن ساخته شده از سرباره فعال‌شده با قلیا، دو برابر بتن ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی است.

۲-۱۰-۱. تاثیر مشخصات ماده پایه (سرباره)

در مقایسه با سایر محصولات جانبی و مواد آلومینوسیلیکات طبیعی، سرباره‌های دارای مقدار کلسیم بالا، بیشتر در معرض انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی است. گاهی اوقات انبساط آن حتی شدیدتر از مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی است. دلیل آن ممکن است به میزان کلسیم و قلیائیت بالای سرباره مربوط باشد. همانطور که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است، باخارف و همکاران (۲۰۰۱)، برای ارزیابی دوام مخلوط‌های ساخته‌شده از سرباره فعال‌شده با قلیا با مخلوط‌های ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی از روش آزمایش منشور بتنی استفاده کردند و دریافتند که مخلوط ساخته‌شده از سرباره فعال شده با آب‌شیشه نسبت به بتن ساخته‌شده از سیمان پرتلند معمولی، بیش‌تر مستعد آسیب مخرب ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی است. مقادیر انبساط سرباره فعال شده با آب‌شیشه و بتن با سیمان پرتلند معمولی به ترتیب 0.1% و 0.3% پس از ۲۲ ماه بوده است.

¹. Gifford & Gillott



شکل ۲-۷ مقایسه انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن با سیمان پرتلند معمولی و بتن سرباره‌ای فعال شده باقلیا (باخارف و همکاران، ۲۰۰۱)

تانزر و استفان^۱ (۲۰۱۷) تأثیر قلیائیت ذاتی بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات سرباره‌ای فعال شده با قلیا را آزمایش کردند و اظهار داشتند قلیائیت زیاد در سرباره فعال شده با قلیا باعث رخداد واکنش قلیایی سیلیسی می‌شود و مکانیسم واکنش مذکور را پیچیده‌تر می‌کند. با این حال، همانطور که قبلاً بحث شد، شی و همکاران (۲۰۱۵) نتایج متفاوتی در معرض شرایط مختلف بدست آوردند. در نمونه‌های منشوری ملات سرباره فعال شده با قلیا در مقایسه با نمونه‌های ملاتی ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی، هنگامی این نمونه‌ها در محلول سود یک مولار (بازه زمانی آزمایش نیز کوتاه مدت بود)، قرار داشتند، مقدار انبساط کمتر بود، اما هنگامی که شرایط نگهداری تحت محیط بخار یا در معرض مستقیم با آب بود (و بازه زمانی آزمایش نیز طولانی مدت بود)، نتایج کاملاً برعکس بدست آمد که با نتایج به دست آمده از مطالعات انجام شده توسط فرناندز - جیمینز^۲ و پوئرتاس (۲۰۰۲) هم‌خوان بود و این محققین دلیل این موضوع را به سرعت پایین واکنش قلیایی سیلیسی در ملات مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نسبت دادند. به هر حال، مخلوط‌های دارای کلسیم زیاد بیشتر مستعد رخداد واکنش قلیایی سیلیسی هستند، زیرا مقدار کلسیم زیاد قلیائیت برای شروع واکنش قلیایی سیلیسی اثرگذار بوده و لازم است اقدامات لازم برای متوقف کردن این واکنش در مخلوط‌های حاوی کلسیم زیاد در نظر گرفته شده باشد.

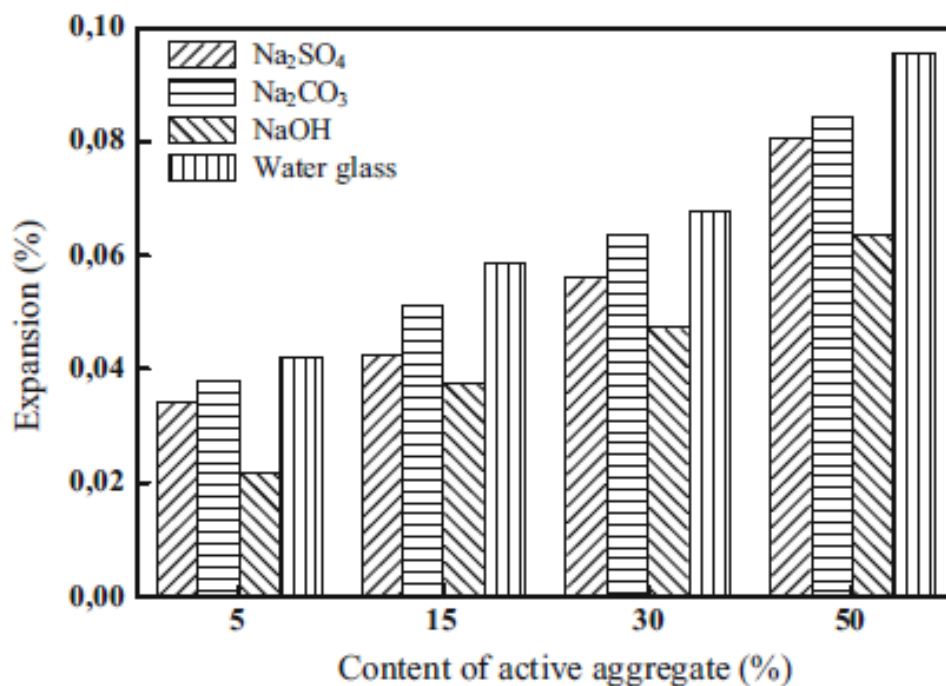
¹. Tänzler & Stephan

². Fernández-Jiménez

۲-۱۰-۲. فعال ساز قلیایی

۲-۱۰-۲-۱. نوع فعال کننده

از آنجا که کاتیون‌ها و آنیون‌های فعال کننده نقش مهمی در فعال سازی قلیایی ایفا می کنند، استفاده از فعال کننده های مختلف، ترکیبات شیمیایی و ریزساختارهای متفاوتی از محصولات واکنش ایجاد می کند و در نتیجه منجر به رفتار متفاوت واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط های فعال شده با قلیا می شود (وانگ و نوگچی، ۲۰۰۲). یو-ژی^۱ همکاران (۲۰۰۲) به بررسی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه بر روی ملات های مبتنی بر سرباره فعال شده با چهار نوع فعال کننده با استفاده از روش تسریع شده انبساط نمونه های منشوری ملات پرداختند. با دقت در شکل ۲-۸، به ترتیب بیشترین انبساط ناشی از این واکنش در مخلوط های فعال شده توسط سدیم سیلیکات (آب-شیشه)، (Na_2CO_3) ، (Na_2SO_4) و $(NaOH)$ مشاهده شده است. علاوه بر این، به نظر می رسد این روند تحت تأثیر مقدار حساسیت سنگدانه ها به واکنش قلیایی سیلیسی قرار نمی گیرد.



شکل ۲-۸ تاثیر انواع فعال کننده بر روی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه (باخارف، ۲۰۰۱)

یانگ و پی^۲ (۱۹۹۹) واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه در ملات با سرباره فعال شده با قلیا را با استفاده از کربنات سدیم، هیدروکسید سدیم و آب شیشه به عنوان فعال کننده قلیایی با محتوای سرباره یکسان مورد بررسی قرار دادند. انبساط ملات های مربوطه به ترتیب از کم به زیاد برابر با سدیم

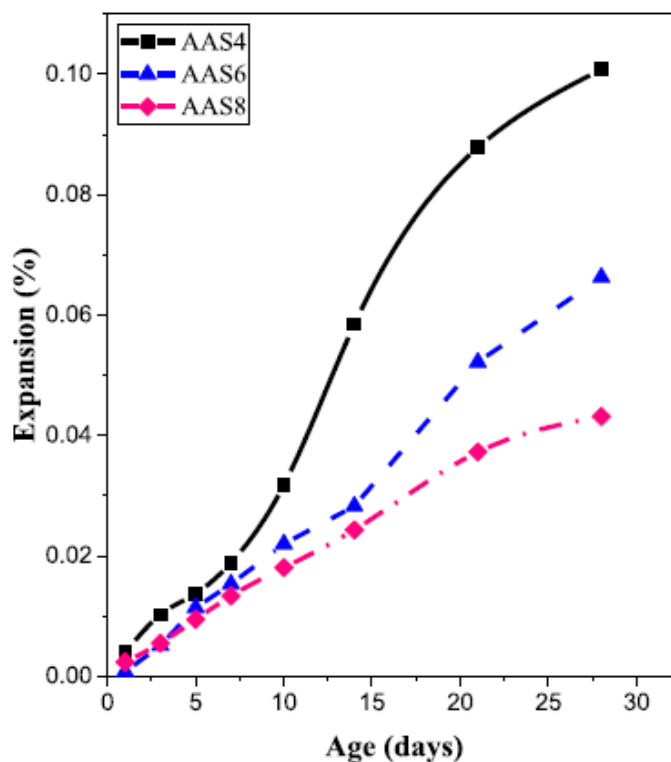
^۱. You-zhi

^۲. Yang & Pu

هیدروکسید ($NaOH$)، سدیم کربنات (Na_2CO_3) و آب شیشه بود، که با نتایج به دست آمده از چن و همکاران مطابقت داشته است (یو-ژی و همکاران، ۲۰۰۲: ۶۲-۶۰). آن‌ها همچنین ملات سرباره‌ای فعال شده توسط آب‌شیشه و کربنات سدیم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد، ملات‌های سرباره‌ای فعال شده توسط آب‌شیشه بدون توجه به محتوای سرباره، انبساط بیشتری نسبت به ملات‌های سرباره‌ای فعال شده توسط سدیم کربنات دارند (یانگ و پو، ۱۹۹۹: ۱۹-۱۴). با این حال، (گیفورد و گیلوت، ۱۹۹۶: ۲۶-۲۱)، هر دو واکنش قلیایی کربناتی و واکنش قلیایی سیلیسی را در بتن فعال شده با قلیا توسط سدیم کربنات و آب‌شیشه به عنوان فعال کننده با ۶٪ قلیایی معادل (Na_2O_{eq}) به مدت یک سال تحت دمای ۳۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰٪ مورد بررسی قرار دادند. مشاهدات آن‌ها نشان داد تفاوت مشخصی بین دو فعال کننده قلیایی در هر دو نوع واکنش قلیایی سنگدانه وجود نداشت. (تانزر و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۰-۸۲) و همکاران (تانزر و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۰-۸۲) تأثیر کاتیون‌های قلیایی (سدیم و پتاسیم) بر رفتار واکنش قلیایی سیلیسی را بررسی کردند و یافتند که سرباره فعال شده توسط فعال کننده‌های مبتنی بر پتاسیم از نظر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی، بهتر از فعال کننده‌های مبتنی بر سدیم عمل می‌کند. نتایج بررسی‌های شی و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داد تحت آزمایش *ASTM C1260*، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات سرباره‌ای فعال شده با آب‌شیشه بیشتر از ملات سرباره‌ای فعال شده با محلول سود (سدیم هیدرواکسید) است. وقتی لی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر نوع فعال کننده بر واکنش قلیایی سیلیسی بر مخلوط‌های (سرباره یا خاکستر بادی) فعال شده با قلیا را به ترتیب تحت آزمایش‌های *ASTM C1293* و *ASTM C1567* بررسی کردند، در هر دو روش آزمایش، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بر خاکستر بادی فعال شده با آب‌شیشه بیشتر از خاکستر بادی فعال شده با سدیم هیدروکسید بود. با این حال، مخلوط‌های مبتنی بر سرباره تحت دو آزمایش مذکور عملکرد متفاوتی از خود نشان دادند، تحت آزمایش *ASTM C1293*، انبساط ناشی از واکنش بر روی سرباره فعال شده توسط سدیم هیدروکسید بسیار بیشتر از سرباره فعال شده توسط سدیم سیلیکات (آب‌شیشه) مشاهده شده است. آن‌ها دلیل این موضوع را به مدت زمان آزمایش‌ها نسبت دادند. به عبارتی، مدت زمان کوتاه آزمایش *ASTM C1567* ممکن است انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های فعال شده با قلیا را ناچیز تعیین کنند. هیدراسیون مخلوط‌های مبتنی بر خاکستر بادی فعال شده با قلیا بسیار آهسته است، در حالی که هیدراسیون مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا بسیار سریع، و همچنین جمع‌شدگی ذاتی در مراحل اولیه زیاد بوده است. علاوه بر این، نتایج برخی از تحقیقات نشان می‌دهد رشد مقاومت در سرباره فعال شده با سدیم سیلیکات (آب‌شیشه) نسبت به سرباره فعال شده با سدیم هیدروکسید سریع‌تر است. بنابراین، انبساط مخلوط‌های کم کلسیم مبتنی بر خاکستر بادی در هر دو روش آزمایش تقریباً یکسان بوده است، در حالی که در مخلوط‌های سرشار از کلسیم بالا، اثر مدت زمان آزمایش و نوع فعال کننده موثر بوده، و در نتیجه انبساط در دو روش آزمایش متفاوت است (وانگ و نوگاچی، ۲۰۲۰: ۱۱۹-۱۰۵).

۲-۱۰-۲. مقدار محتوای قلیایی

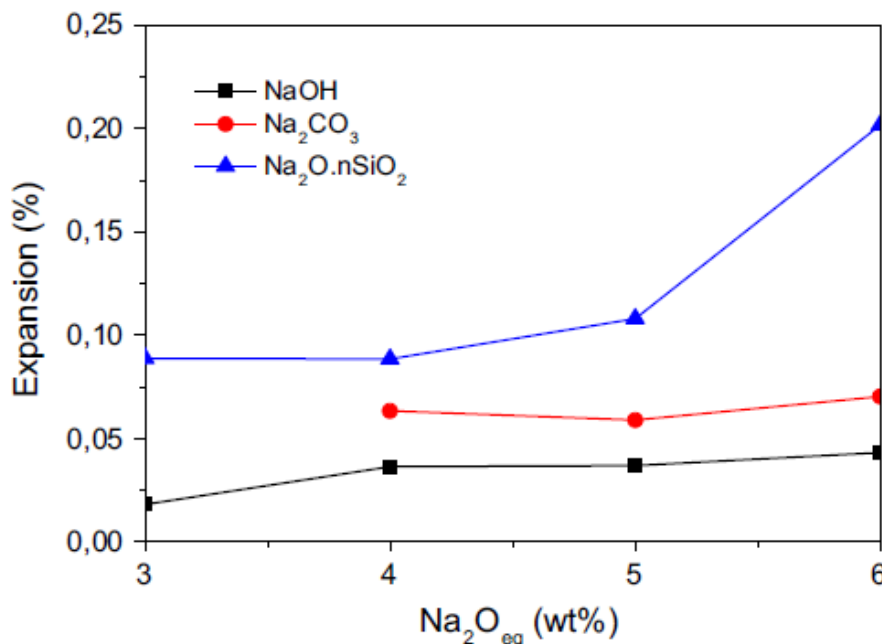
مقدار محتوای قلیا یکی از سه عامل مهم تعیین‌کننده بروز واکنش قلیایی سنگدانه است. در نتیجه، محتوای آن تأثیرات قابل‌توجهی بر این واکنش خواهد داشت. شی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر میزان قلیایی بر واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های سرباره فعال شده با سدیم هیدروکسید با استفاده از آزمایش تسریع شده نمونه‌های منشوری ملات پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش مقدار قلیایی در ملات با سرباره فعال شده با قلیا، برخلاف روندهایی که معمولاً در ملات‌های مبتنی بر سیمان پرتلند ملاحظه می‌شد، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۹). آن‌ها دلیل مقدار انبساط کم ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی، در دوز قلیایی بیشتر را به غلظت بالای آلومینیوم در محلول منافذ، ناشی از میزان واکنش بیشتر سرباره در دوز قلیایی بالاتر نسبت دادند.



شکل ۲-۹ تأثیر غلظت سدیم هیدروکسید بر روی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا (شی و همکاران، ۲۰۱۷)

مورائس نوس (۲۰۱۶) اظهار داشت که انبساط واکنش قلیایی سنگدانه در بتن با سرباره فعال شده با قلیا، با افزایش محتوای قلیایی از ۳ تا ۶ درصد (Na_2O_{eq}) بدون در نظر گرفتن نوع فعال‌کننده مورد استفاده، افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. به نظر می‌رسد وقتی مقدار قلیایی از ۴ درصد بیشتر شود، تغییرات قابل‌توجهی در انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی برای ملات‌های فعال‌شده با سدیم کربنات و سدیم هیدروکسید مشاهده شده است. یو-ژی و همکاران

(۲۰۰۲) دریافتند که با افزایش مقدار محتوای جرمی قلیایی سرباره فعال شده با قلیا (آب شیشه، $NaOH$ ، Na_2SO_4 ، Na_2CO_3) از ۲٪ به ۶/۵٪، انبساط ملات‌ها افزایش می‌یابد. بررسی‌های العطیبی^۱ (۲۰۰۸) نشان داد که انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن سرباره فعال شده با سیلیکات یا سدیم متاسیلیکات حاوی ۶ درصد قلیا نسبت به ۴ درصد قلیایی بیشتر است. و با افزایش مقدار قلیائیت، انبساط نیز افزایش می‌یابد.



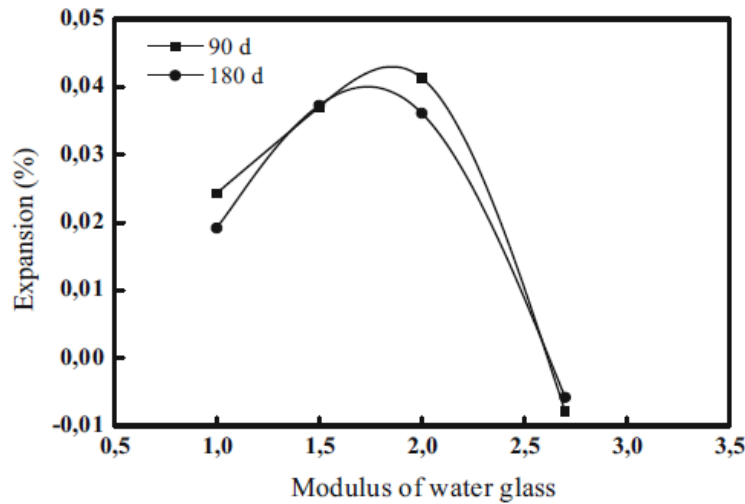
شکل ۲-۱۰ تاثیر مقدار قلیائیت در انبساط ناشی از واکنش قلیایی (یانگ و همکاران، ۱۹۹۹)

۲-۱۰-۳. مدول سیلیکات آب شیشه

آب شیشه یک فعال کننده قلیایی است که معمولاً برای فعال سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مدول آن تاثیر قابل توجهی بر عملکرد اتصال دهنده‌های فعال شده با قلیا دارد. یانگ و همکاران (۱۹۹۹) اظهار داشتند که ملات‌های سرباره فعال شده با آب شیشه با مدول سیلیکات ۲، دارای بیشترین انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه در مقایسه با مواد قلیایی مشابه و مدول سیلیکات متفاوت است، این موضوع در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. العطیبی (۲۰۰۸) گزارش داد، مدول آب شیشه بتن به طور قابل توجهی بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط بتنی مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا تاثیر می‌گذارد. هنگامی که محتوای قلیایی ۴ یا ۶ است. بتن با مدول سیلیکات ۱/۶۵، دارای انبساط کمتری نسبت به بتن‌هایی است که دارای مدول سیلیکات یک هستند. به نظر می‌رسد این نتایج با نتایج شکل ۲-۱۱ مطابقت نداشته باشد. در حقیقت، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی نه تنها تحت تاثیر مدول سیلیکات آب شیشه قرار می‌گیرد، بلکه تحت تاثیر

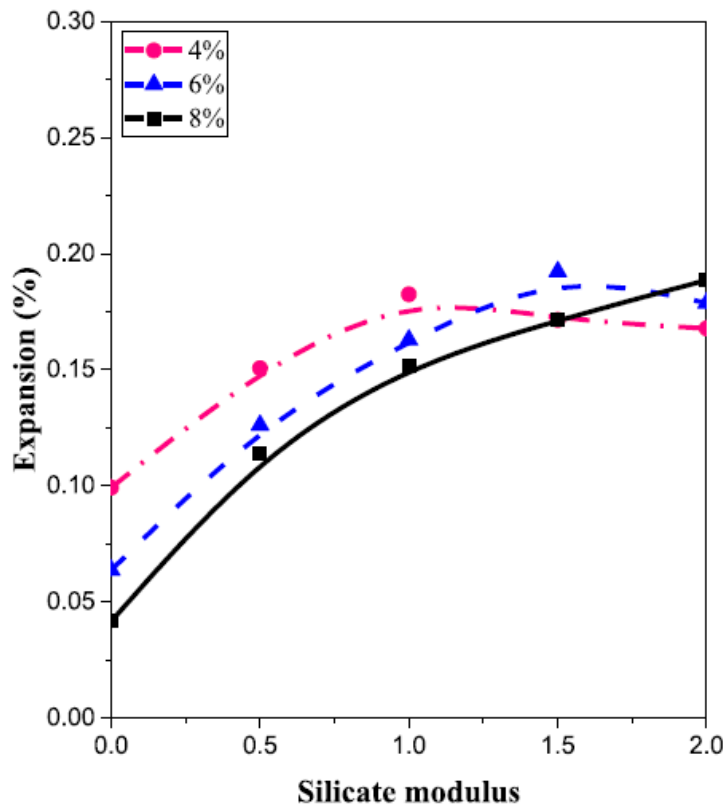
¹. Al-Otaibi

قلیایی نیز قرار دارد. اثرات مدول سیلیکات بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بستگی به محتوای قلیایی داشته و بالعکس نیز، همان ارتباط برقرار است.



شکل ۲-۱۱ تأثیر مدول آب‌شیشه بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه (یانگ و همکاران، ۱۹۹۹)

علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ آمده است، بررسی‌های شی و همکاران (۲۰۱۸) بر روی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های سرباره‌ای فعال‌شده توسط مدول‌های مختلف آب‌شیشه، مشخص شد میزان دوز قلیایی بستگی به مدول سیلیکات دارد.



شکل ۲-۱۲ تأثیر دوز قلیایی و مدول سیلیکات بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا از ۲۸ روز (شی و همکاران، ۲۰۱۸)

تانزر و همکاران (۲۰۱۷) بر روی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های سرباره‌ای فعال‌شده با محلول سیلیکات قلیایی با مقادیر مختلف قلیائیت (۲ یا ۴ مول بر کیلوگرم در محلول سیلیکات) و مدول سیلیکات (۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۲) و یون‌های قلیایی (سدیم و پتاسیم) مطالعه نمودند. ایشان در مدت زمان هفت ماه پژوهش و بررسی، به این نتیجه رسیدند که مقدار غلظت قلیایی، مدول سیلیکات و کاتیون‌های قلیایی فعال‌کننده‌ها مکمل یکدیگر هستند. هنگامی که مقدار مدول یک و غلظت قلیایی دو مول بر کیلوگرم بوده است، انبساط ملات سرباره‌ای فعال شده با محلول سیلیکات پتاسیم بیشتر از ملات‌های فعال شده با سیلیکات سدیم بوده است. در مقابل، هنگامی که مقدار مدول سیلیکات به دو افزایش یافت، ولی غلظت قلیایی همان مقدار دو مول بر کیلوگرم باقی ماند، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بر روی ملات‌های فعال شده با سیلیکات پتاسیم کمتر از سیلیکات سدیم است. علاوه بر این، هنگامی که مدول سیلیکات برابر با مقدار یک باقی ماند و غلظت قلیایی به مقدار ۴ مول بر کیلوگرم افزایش یافت، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بر روی ملات‌های فعال شده با سیلیکات سدیم یا سیلیکات پتاسیم تقریباً یکسان بود. بنابراین، برای درک رفتار واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های فعال شده با قلیا لازم است چندین عامل را هم‌زمان در نظر گرفت، در غیر این صورت نتایج متفاوتی و متناقض به دست خواهد آمد.

به‌طور کلی تأثیر مقدار مصرف فعال‌کننده‌ها بر واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا به مدول سیلیکات فعال‌کننده‌ها بستگی دارد و بالعکس. علاوه بر این، اکثر مطالعات قبلی هنگام مطالعه واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا از فعال‌کننده‌های مبتنی بر سدیم استفاده شده است. با این حال، فعال‌کننده‌های دیگر نیز باید مورد توجه قرار گیرند، به‌ویژه هنگام استفاده از فعال‌کننده مبتنی بر اکسید کلسیم، زیرا کلسیم تأثیر زیادی بر توسعه ژل ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی دارد (وانگ و نوگاچی، ۲۰۲۰: ۱۱۹-۱۰۵).

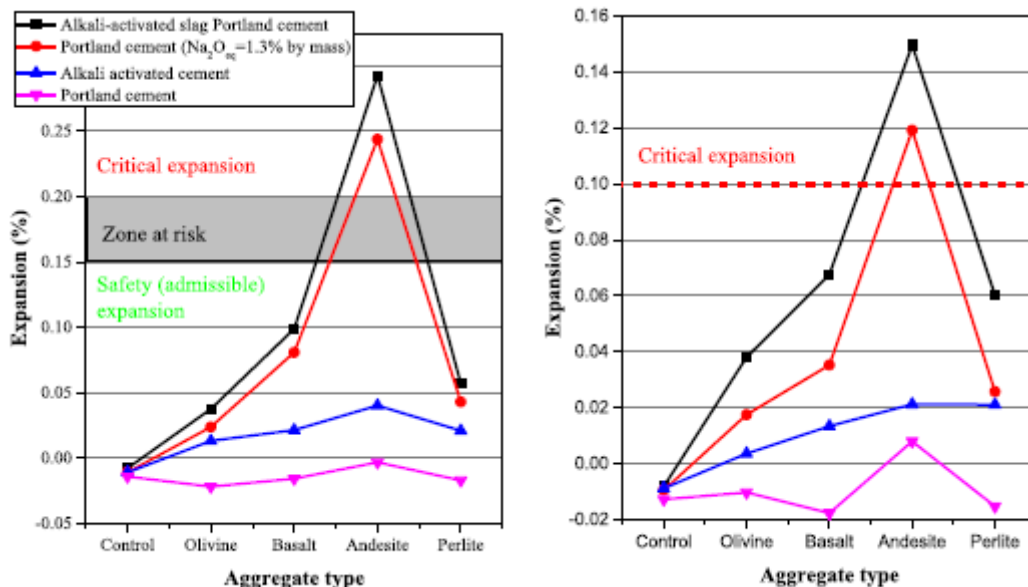
۲-۱۰-۳. سنگدانه‌های واکنش‌پذیر

واکنش‌پذیری قلیایی سنگدانه‌ها نقش مهمی در وقوع واکنش قلیایی سیلیسی ایفا می‌کند. نوع، مقدار، ترکیب معدنی و توزیع اندازه سنگدانه‌های واکنش‌پذیر بر واکنش قلیایی سنگدانه تأثیرگذار است. نوع و میزان واکنش و همچنین درجه تغییرات ناشی از واکنش در سنگدانه‌ها متفاوت است. به‌طور کلی، واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی را می‌توان به دو دسته، واکنش قلیایی سیلیسی (ASR) و واکنش قلیایی کربناتی (ACR) طبقه‌بندی نمود. ضمناً، دسته اول بسیار متداول‌تر نسبت به دسته دوم است (وانگ و نوگاچی، ۲۰۲۰: ۱۱۹-۱۰۵).

گیفورد گیلوت (۱۹۹۶) آزمایش استاندارد تغییر ابعادی بتن با سیمان پرتلند معمولی و بتن سرباره‌ای با استفاده از شش منبع سنگدانه واکنش‌پذیر در کانادا، انجام دادند، آن‌ها یافتند که بتن سرباره‌ای فعال‌شده با قلیا در مقایسه با بتن با سیمان پرتلند معمولی، بیشتر مستعد انبساط ناشی از واکنش قلیایی کربناتی و کمتر مستعد انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی هستند. انبساط ناشی از واکنش قلیایی کربناتی در بتن سرباره‌ای فعال شده با قلیا دو برابر بتن با سیمان پرتلند معمولی

است. در مقابل مطالعات پوئرتاس و همکاران (۲۰۰۹)، بر روی اثرات سنگدانه بر واکنش قلیایی سنگدانه ملات‌های سرباره‌ای فعال شده با آب‌شیشه نشان داد که ملات‌های حاوی سنگدانه سیلیس واکنش‌پذیر دارای انبساط زیادی هستند، در حالی که ملات‌های حاوی سنگدانه آهکی واکنش‌پذیر دارای انبساط کم‌تری هستند. علاوه بر این، در ملات‌های سرباره فعال شده با قلیا با سنگدانه‌های آهکی غیر واکنش‌پذیر هیچ تغییری در حجم مشاهده نشد، در حالی که افزایش قابل توجهی در مقاومت مکانیکی داشته‌اند.

کوپاد-پاتیل و آلوچه^۱ (۲۰۱۳) ترکیبات مختلفی از سه نوع سنگدانه (کوارتز، سنگ‌آهک، و ماسه‌سنگ) و سه نوع خاکستر بادی (دو خاکستر بادی کلاس F و یک خاکستر بادی کلاس C) و سیمان پرتلند معمولی را بررسی نمودند و نشان دادند در هر دو مخلوط ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی و یا بتن فعال شده با قلیا، نوع سنگدانه‌ها تأثیر مشهودی بر واکنش قلیایی سیلیسی دارد. اخیراً کریونکو و همکارانش (۲۰۱۴) نیز، پس از یک‌سال مطالعه واکنش قلیایی سیلیسی بر روی مخلوط‌های بتنی فعال شده با قلیا و مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی که حاوی انواع سنگدانه‌های واکنش‌پذیر (با طیف وسیعی از اندازه ذرات) بودند، به این نتیجه رسیدند که سیلیس آمورف در سنگدانه‌های بسیار واکنش‌پذیر، می‌تواند با قلیائیت زیاد موجود در فعال‌کننده‌ها واکنش دهد. در نتیجه، واکنش قلیایی سیلیسی در طول فعال‌سازی، توسط فعال‌کننده قلیایی شروع می‌شود و همین موضوع، پیچیدگی مکانیسم رفتار واکنش در مخلوط‌های فعال شده با قلیا را افزایش می‌دهد. نتایج مطالعات ایشان در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.

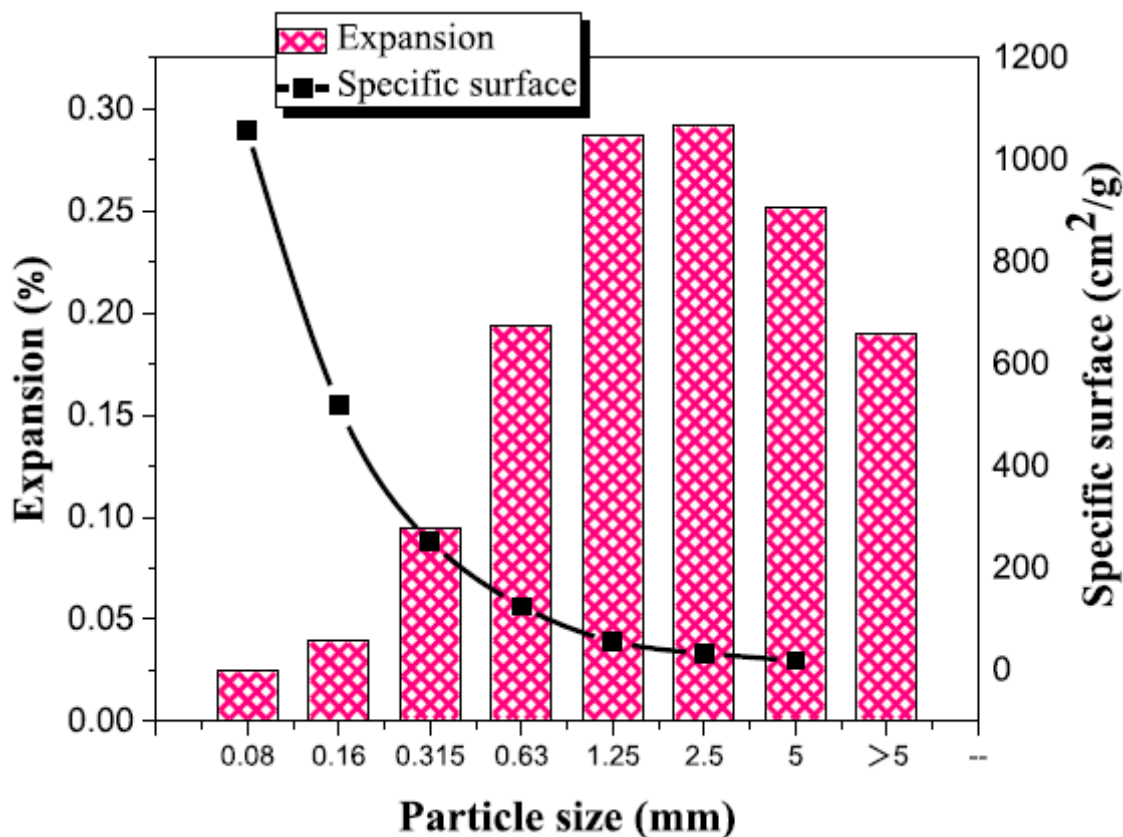


شکل ۲-۱۳ مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش تحت شرایط: الف) آزمایش تسریع شده (۲۸ روز عمل آوری مداوم با بخار در معرض دمای ۷۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد) ب) آزمایش استاندارد (معرض دمای ۲۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد برای مدت یک‌سال) (کریونکو و همکاران، ۲۰۱۴)

¹. Kupwade-Patil & Allouche

در مورد "حداکثر اثرگذاری" بین انبساط بیشینه و نسبت ثابت سنگدانه‌های واکنش‌پذیر در اندازه معین، گارسیا-لودریو و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های مبتنی بر خاکستر بادی فعال‌شده با سدیم هیدرواکسید، پرداختند. مشاهدات آن‌ها نشان داد، پس از گذشت ۹۰ روز از سن ملات‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سیلیسی، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی کمتر از حد مجاز ۰/۱٪ بوده است. در ملات‌هایی که ترکیبی از سنگدانه‌های اپالینی و سیلیسی (۱۰٪ سنگدانه اپالینی و ۹۰٪ سنگدانه سیلیسی) استفاده شده است، انبساط ناچیزی را داشته‌اند. یو-ژی و همکاران (۲۰۰۲)، تأثیر میزان واکنش و اندازه سنگدانه را در انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بر روی ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا را بررسی نمودند و دریافتند، هنگامی که مقدار محتوای قلیائیت کمتر از ۵٪ باشد، ملات‌های سرباره‌ای فعال‌شده با قلیا تحت تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی قرار نمی‌گیرد، مگر این‌که مقدار سنگدانه واکنش‌پذیر بیش از ۱۵٪ باشد. علاوه بر این، اندازه سنگدانه‌ها در محدوده ۰/۰۸ میلی‌متر تا ۲/۵ میلی‌متر، با کاهش سایز سنگدانه انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی افزایش می‌یابد دلیل آن را می‌توان به سطح تماس بیشتر سنگدانه‌های واکنش‌پذیر نسبت داد.

این موضوع همانطور که شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است، با نتایج بدست آمده توسط گارسیا-لودریو و همکاران (۲۰۰۷)، مطابقت داشته است.



شکل ۲-۱۴ تأثیر اندازه دانه بر انبساط و سطح تماس سنگدانه (یانگ و پو، ۱۹۹۹)

در مطالعات شی و ژنگ (۲۰۰۷) به بررسی تاثیر مقدار بکارگیری پودر شیشه بر روی انبساط ملات حاوی ماسه اسپرات واکنش‌پذیر پرداختند و مشخص شد که با افزایش سطح جایگزینی شیشه، انبساط میله ملات کاهش می‌یابد. آن‌ها دلیل این روند را به هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) با نسبت کم (Ca/Si)، که باعث حفظ قلیائیت در (C-S-H) می‌شود، نسبت دادند. توماس و اینیس (۱۹۹۸) استفاده از سرباره تا ۶۵٪ جایگزینی با هدف کنترل سرعت انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه با استفاده از آزمایش منشور بتنی و آزمایش میله ملات، را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مطالعات خود از شش نوع سنگدانه استفاده کردند، چهار مورد از آن‌ها به عنوان مستعد واکنش قلیایی سیلیسی (سنگ آهک سیلیسی، ماسه‌سنگ، خاکستری و گرانیات)، یکی به عنوان مستعد واکنش قلیایی کربناتی (سنگ آهک دولومیتی) و یکی از سنگدانه‌ها نیز به عنوان غیر واکنش‌پذیر (دولوستون) طبقه‌بندی شدند. در بتن‌های که از هر چهار سنگدانه واکنش‌پذیر قلیایی سیلیسی ساخته شده بودند، دریافتند که جایگزینی سیمان پرتلند معمولی با سرباره در محدوده ۲۵ تا ۶۵ درصد، در به تأخیر انداختن سرعت انبساط و محدود کردن انبساط نهایی در مدت زمان دو سال در بتن موثر است. با این حال، کمترین مقدار جایگزینی سرباره لازم برای کنترل انبساط در سطح مناسب (به عنوان مثال، ۰/۰۴ در مدت زمان ۲ سال) بسته به ماهیت سنگدانه و مقدار قلیایی موجود در بتن متفاوت است.

بررسی‌های یانگ و همکاران (۱۹۹۹)، در مورد تاثیر مقدار بکارگیری سنگدانه‌های واکنش‌پذیر کوارتزی بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه، در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، نشان داد در ملات‌هایی که حداکثر ۵ درصد از این نوع سنگدانه‌ها استفاده شده بود، بدون توجه به مقدار قلیائیت مخلوط، انبساط ناشی از این واکنش هرگز از محدود مجاز آزمایش ملات تسریع‌شده فراتر نرفت و با افزایش مقدار درصد جرمی سنگدانه‌های واکنش‌پذیر کوارتزی، بدون توجه به نوع فعال‌ساز قلیایی، افزایش تدریجی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی مشهود بوده است.

احمد^۱ و همکاران (۲۰۰۳)، در رابطه با جذب آب و انبساط نمونه‌ها دریافتند که سنگدانه با درجه واکنش‌پذیری بالا در مقایسه با سنگدانه با درجه واکنش‌پذیری متوسط، برای رسیدن به یک میزان مشخصی از انبساط، آب بیش‌تری جذب می‌نماید. این مقایسه اثبات می‌کند که میزان آب مورد تقاضا برای سنگدانه‌های واکنش‌پذیر با یک‌دیگر متفاوت بوده که وابسته به درجه و سطح انبساط نمونه‌ها است. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها این ادعا را تأیید می‌کند که انبساط نمونه‌ها و جذب آن‌ها رابطه‌ی مستقیم و مناسبی باهم دارند. با گذشت زمان، نرخ جذب آب افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل توسعه و گسترش ترک‌ها در سنین مختلف باشد. بنابراین، جذب آب می‌تواند وابسته به دو عامل تولید ترک‌های جدید و گسترش ترک‌های تولید شده باشد، که باعث می‌شود آب به نقاط جدید دسترسی داشته باشد.

به‌طور کلی اکثر تحقیقات موجود از شیشه کوارتز و اپالی به عنوان سنگدانه‌های واکنش‌پذیر قلیایی استفاده کردند. با این حال، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه، در مخلوط‌های فعال شده با قلیا ممکن است قبل از فعال شدن مخلوط، هنگام استفاده از این نوع سنگدانه‌های واکنش‌پذیر ایجاد شود.

^۱. Ahmed

مطالعات در مورد عملکرد سنگدانه‌های واکنش‌پذیر طبیعی در مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا نسبتاً محدود است و مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است (شی و همکاران، ۲۰۱۵: ۶۲۸-۶۲۱).

۱۱-۲. روش‌های ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی

روش آزمایش میله ملات تسریع‌شده (*ASTM C1260*) و روش منشور بتنی (*ASTM C1293*) معمولاً برای بررسی واکنش‌پذیری قلیایی سنگدانه‌ها و اندازه‌گیری تغییر طول، ناشی از واکنش قلیایی استفاده می‌شود به دلیل سرعت بالا در ارائه‌ی نتایج، آزمایش *ASTM C1260* محبوبت بیشتری دارد. غالباً نتایج آزمایش از دقت خوبی برخوردار است، اگرچه در بعضی که سنگدانه دارای درجه واکنش‌پذیری آهسته و یا متوسط است، نتایج آن چندان مورد تأیید نیست (ویسر، ۲۰۱۸: ۳۰-۱۸؛ توما^۱ و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۶۵-۱۵۷؛ پروویس و وان دوندتر^۲، ۲۰۱۳). این موضوع مخصوصاً برابر مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا بیشتر رخ می‌دهد. زیرا از یک‌سو، در صورت وجود قلیایی بالا در محیط خارجی (قلیائیت خارجی)، نه تنها قلیائیت ذاتی بالا در مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا نادیده گرفته می‌شوند و نمی‌توانند تاثیر خود را به صورت موثرتر نشان دهند، بلکه محلول قلیایی خارجی بالا نیز با مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا (به‌ویژه در مراحل اولیه هیدراتاسیون) واکنش نشان می‌دهد، که تأثیر قابل توجهی بر نتایج خواهد داشت و منجر به اشتباه می‌گردد. با توجه به این مشکل، شی و همکاران (۲۰۱۵) برای مطالعه تأثیر محتوای قلیایی زیاد بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی، به مقایسه انبساط ملات‌های ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی و سرباره فعال‌شده با قلیا در معرض شرایط متفاوت محیطی پرداختند همانطور که از شکل ۲-۱۵ مشخص است، انبساط ملات‌های فعال‌شده با قلیا نسبت به ملات با سیمان پرتلند معمولی، در معرض محلول سود یک مولار (سدیم هیدروکسید) و دمای ۸۰ درجه سلسیوس کمتر بوده است. با این وجود، در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و تحت شرایط آب یا بخار نمونه‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی تقریباً هیچ‌گونه انبساطی نداشته است، در حالی که ملات‌های فعال‌شده با قلیا انبساط مشاهده شده است. در نتیجه مشخص شد که تحت شرایط تشدید یافته مختلف، تأثیر متفاوتی بر روی ملات با سیمان پرتلند معمولی و ملات‌های فعال‌شده با قلیا دارد. در نتیجه ممکن است تاثیر واکنش قلیایی سیلیسی بر روی مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا تحت آزمایش *ASTM C1260* ناچیز در نظر گرفته شود.

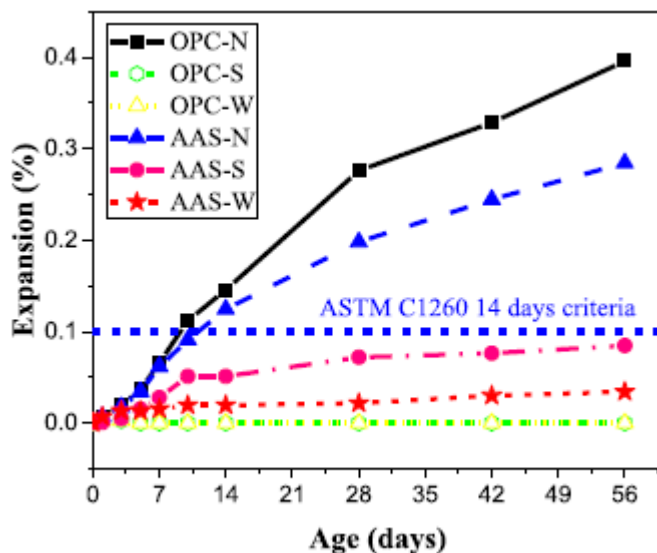
از طرفی، درجه حرارت بالا (۸۰ درجه سلسیوس) در طول مدت زمان قرار گرفتن مخلوط تحت آزمایش *ASTM C1260* یکی از ایرادهای وارده است. برخی از محققان (هوانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۸: ۹۸۵-۹۷۸؛ باخارف، ۲۰۰۵: ۱۲۳۲-۱۲۲۴) نشان داده‌اند که درجه حرارت تأثیر زیادی بر هیدراتاسیون مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا دارد و ممکن است محصولات واکنش متفاوتی تولید کند که در نهایت بر عملکرد واکنش قلیایی سیلیسی مؤثر است. در عین حال، درجه حرارت بالا بر حلالیت

¹. Touma

². Provis & Van Deventer

³. Huang

و پایداری محصولات هیدراتاسیون تأثیر می‌گذارد و در نتیجه محلول منافذ نمونه‌ها را متفاوت از بتن واقعی تغییر می‌دهد. علاوه بر این، کوتاه مدت بودن زمان آزمایش، یکی دیگر از ایرادهای وارده است.



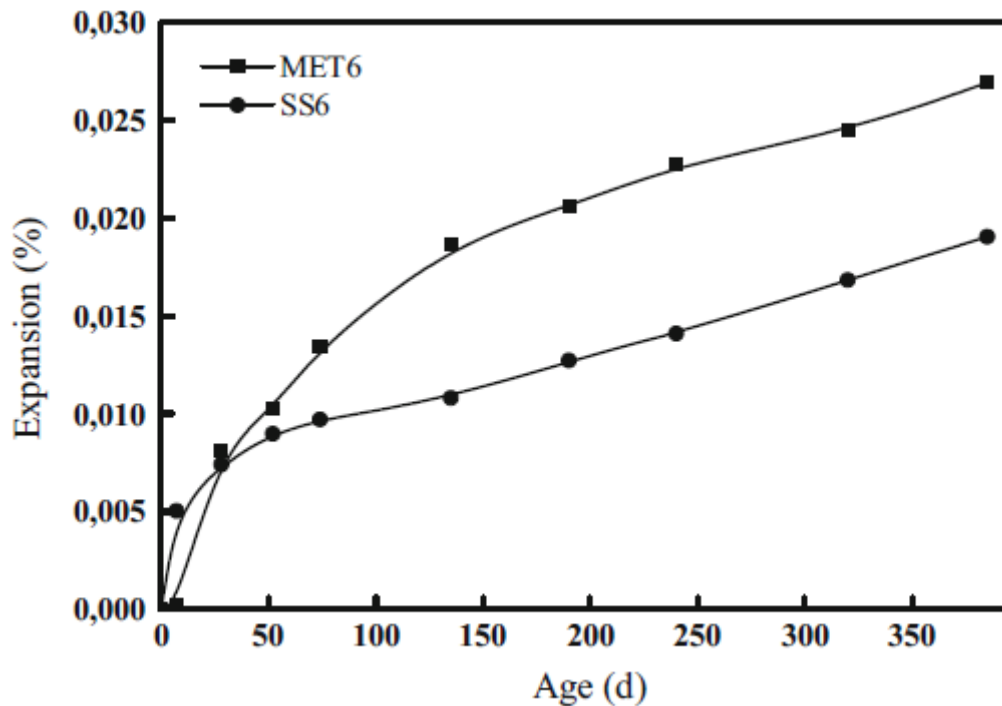
شکل ۲-۱۵ مقایسه انبساط ناشی واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های فعال شده با قلیا و ملات با سیمان پرتلند معمولی در معرض شرایط مختلف (تالینگ و برندستتر^۱، ۱۹۸۹). AAS: سرباره فعال شده با قلیایی (OPC: سیمان پرتلند معمولی؛ N: محلولور یک مولار سود، W: آب در دمای درجه سلسیوس ۸۰، K: بخار در دمای ۸۰ درجه سلسیوس)

نتایج سی^۲ و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که زمان هیدراتاسیون مخلوط‌های فعال شده با قلیا و مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی بسیار متفاوت است، در واقع مخلوط‌های فعال شده با قلیا نسبت به مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی، سریع‌تر هیدراته می‌شود و ممکن است باعث جمع‌شدگی گردد و در نتیجه مقدار انبساط جزئی ناشی از واکنش را در مرحله اولیه خنثی کند. علاوه بر این، مشاهدات (فرزنداندز-جیمنز و پوئرتاس، ۲۰۰۲:۱۰۲۴-۲۰۰۲:۱۰۱۹)، تاخیر در انبساط ملات‌های فعال شده با قلیا را تایید کردند. بنابراین، مدت زمان آزمایش *ASTM C1260* برای برآورد مناسب واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های فعال شده با قلیا بسیار کوتاه است. محقین (شی و همکاران، ۲۰۱۵؛ مهاناما^۳ و همکاران، ۲۰۱۹) برای رفع این معضل، افزایش مدت زمان آزمایش را پیشنهاد نمودند. اما همچنان دو مشکل دیگر (درجه حرارت بالا و محلول قوی قلیایی) به قوت خود باقی مانده است. باخارف و همکاران (۲۰۰۱) گزارش داد که مشاهده انبساط بتن سرباره‌ای در یک دوره دو ساله ضروری است زیرا ممکن است با پیشرفت سریع مقاومت مانع انبساط در بتن سرباره‌ای گردد. همانطور که در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است، این موضوع توسط العتیبی (۲۰۰۸) نیز تأیید شد. به عبارتی اگرچه انبساط بتن سرباره فعال شده با قلیا هنوز پس از یک سال زیر حد مجاز ۰/۰۴٪ است، اما افزایش انبساط در سنین بالاتر بیشتر مشهود است.

¹. Talling & Brandstetr

². Xie

³. Mahanama



شکل ۲-۱۶ اثر مدول آب‌شیشه بر مخلوط سرباره فعال شده با آب‌شیشه، و حاوی ۶ درصد اکسید سدیم (محتوای قلیایی) (العتیبی، ۲۰۰۸)

SS6: سدیم سیلیکات با مدول ۱/۶۵، *MET6*: سدیم متاسیلیکات با مدول یک)

علاوه بر این، سی و همکاران (۲۰۱۵) انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط‌های مبتنی بر قلیایی- فسفر سرباره را با استفاده از روش آزمایش تسریع شده اتوکلاو، نتایج نشان داد که روش آزمایش تسریع شده اتوکلاو برای واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط‌های فعال شده با قلیا مناسب نیست زیرا ممکن است واکنش قلیایی سنگدانه قبل از فعال شدن مواد پایه رخ دهد. اگرچه مقدار قلیایی در ملات سرباره فعال شده با قلیا نسبتاً زیاد است، اما ممکن است در مقایسه با محلول قلیایی زیاد خارجی ناچیز باشد.

سی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از آزمایش‌های *ASTM C1260* و *ASTM C1293*، انبساط ملات و بتن مبتنی بر سرباره فعال شده با آب شیشه، دریافتند که انبساط نمونه‌ها تحت آزمایش *ASTM C1260* در زمان مقرر، کمتر از مقدار معیار معین شده توسط آزمایش مذکور است. در حالی که انبساط نمونه‌ها تحت آزمایش *ASTM C1293* بیش از حد مشخص شده در آزمایش بوده است. آن‌ها دلیل وجود تاخیر در انبساط در مخلوط‌های فعال شده با قلیا را، هیدراتاسیون سریع و توسعه مقاومت اولیه مخلوط‌ها نسبت داده‌اند. روش آزمایش منشور بتنی با توجه به اندازه بزرگ نمونه‌ها که به بتن واقعی نزدیکتر است در نتیجه به احتمال زیاد بیشترین هم‌بستگی و مطابقت را با نتایج نمونه‌ها در شرایط واقعی سازه‌ها دارد، مناسب‌ترین روش در نظر گرفته می‌شود. با این حال، اما به دلیل زمان‌بر بودن آزمایش، کاربردهای گسترده آن را ممنوع کرده است. روش‌های آزمایشی مورد استفاده در مطالعات، در جدول ۲-۲ خلاصه شده است. از آنجا که همه این روش‌ها براساس مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی پیشنهاد شده‌اند، استفاده از این روش‌ها به‌طور مستقیم

بر روی مخلوط‌های فعال شده با قلیا می‌تواند به دلیل محتوای قلیایی بالا و کلسیم کم در مخلوط‌های فعال شده با قلیا مناسب نباشد. به طور خلاصه، محتوای بالای قلیایی و توسعه سریع اتصال دهنده فعال شده با قلیا باعث انبساط اولیه کم توسط واکنش قلیایی سنگدانه می‌شود. برای به دست آوردن اطلاعات جامع و کلی، دوره آزمایش طولانی‌تری لازم است. روش‌های جدید آزمایش برای اندازه‌گیری انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط‌های فعال شده با قلیا باید توسعه داده شود، به‌عنوان مثال، استفاده از عمل‌آوری در معرض آب یا بخار برای تأکید بر تأثیر محتوای قلیایی زیاد بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات سرباره‌ای فعال شده با قلیا، به بررسی بیشتری نیاز دارد (سی و همکاران، ۲۰۱۵).

جدول ۲-۳ خلاصه روشهای آزمایشی مورد استفاده برای واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط‌های فعال شده با قلیا (شی و ژنگ، ۲۰۰۷)

منابع	شرایط آزمایش	روش آزمایش	مخلوط فعال شده با قلیا
[۹۱-۹۹-۱۰۰]	عمل‌آوری: ۲۴ ساعت در آب شرایط نگهداری آزمایش: دمای ۸۰ درجه سلسیوس، محلول سود یک مولار		<i>ASTM C1260</i>
[۹۸]	دمای 38 ± 2 درجه سلسیوس، شرایط مرطوب		<i>ASTM C1293</i>
[۹۲]	عمل‌آوری: عمل‌آوری حرارتی به مدت ۶ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس یا تحت مرطوب معمولی شرایط نگهداری آزمایش: رطوبت نسبی ۱۰۰٪ و دمای ۳۸ درجه سلسیوس		<i>CSA A23.2-14A-94</i> سرباره فعال - شده با قلیا
[۹۴ و ۱۰۱]	عمل‌آوری و شرایط نگهداری آزمایش: رطوبت نسبی بیش از ۹۵٪ و دمای 38 ± 2 درجه سلسیوس	آزمایش میله ملاتی	
[۹۹]	عمل‌آوری: ۲۴ ساعت تحت بخار، دمای ۸۰ درجه سلسیوس شرایط نگهداری آزمایش: دمای ۸۰ درجه سلسیوس، تحت شرایط مرطوب یا در آب	آزمایش اصلاح شده	<i>ASTM C1260</i>
[۱۱۸ و ۹۷]	عمل‌آوری: رطوبت نسبی بیش از ۹۹٪ و دمای ۸۵ درجه سلسیوس شرایط نگهداری آزمایش: دمای ۸۵ درجه سلسیوس، محلول سود یک مولار	آزمایش اصلاح شده	<i>ASTM C1260-94</i> خاکستر بادی فعال شده با قلیا
[۱۱۵]	عمل‌آوری: رطوبت نسبی ۱۰۰٪ و دمای ۶۰ درجه سلسیوس برای ۲۴ ساعت بعد از قالب برداری، حمام آب در دمای ۸۰ درجه سلسیوس برای ۲۴ شرایط نگهداری آزمایش: دمای ۸۰ درجه سلسیوس، محلول سود یک مولار	آزمایش اصلاح شده	<i>ASTM C1260</i>
[۱۱۷]	اتوکلاو در محلول ۱۰٪ پتاسیم هیدروکسید در دمای ۱۵۰ درجه	روش	سیمان و

منابع	شرایط آزمایش	روش آزمایش	مخلوط فعال شده با قلیا
	سلسیوس یا در هوای مرطوب اشباع در دمای ۷۰ درجه سلسیوس	اتوکلاو	خاکستر بادی
		تسریع شده	پر قلیا
[۱۱۰]	عمل‌آوری: یک روز عمل‌آوری استاندارد با قالب، سپس ۴ ساعت اتوکلاو در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و ۶ ساعت در محلول ۱۰٪ پتاسیم هیدروکسید ۱۵۰ درجه سلسیوس	روش اتوکلاو	سرباره فسفری پر قلیا

۲-۱۲. روش‌های کنترل واکنش قلیایی سیلیسی

قبل از بحث در مورد کاهش واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های فعال شده با قلیا، به نتایج بدست آمده از تحقیقات انجام شده در زمینه کاهش واکنش قلیایی سیلیسی، در مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی، بررسی می‌شود.

روش‌های کاهش وقوع واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی، عمدتاً براساس عوامل موثر در وقوع این واکنش (قلیزاده - وایقان و رجب پور، ۲۰۱۷) شامل الف) سیلیس فعال در سنگدانه‌ها ب) قلیائیت کافی در محلول‌های منفذی پ) حل شدن کلسیم ت) رطوبت کافی تعریف می‌شود. در واقع مکانیسم روش‌های موجود در کاهش رخداد واکنش قلیایی سیلیسی، عمدتاً بر اساس تضعیف یا حتی حذف یک یا چند مورد از عوامل موثر در وقوع واکنش مذکور، نظیر استفاده از سنگدانه‌های واکنش‌ناپذیر (سالم) (قلیزاده-وایقان و رجب پور، ۲۰۱۷)، استفاده از مواد مکمل سیمانی (سها و همکاران، ۲۰۱۸؛ توماس، ۲۰۱۱)، محدودیت محتوای قلیایی در محلول منافذ^۱ (مولتون^۱ و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۱۶-۵۰۸) و استفاده از نمک‌های لیتیوم (کیم و آلک، ۲۰۱۵: ۲۱۴-۲۰۴؛ لیمان و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۰۱-۱۹۲) است.

با توجه به خواص مختلف مخلوط‌های فعال شده با قلیا و مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی، برخی از روش‌ها جهت کنترل وقوع واکنش قلیایی سیلیسی ممکن است به دلیل قلیائیت زیاد فعال‌کننده‌ها، بی‌اعتبار باشند. زیرا در این حالت از فعالیت برخی ترکیبات شیمیایی در مخلوط‌های فعال شده با قلیا ممانعت می‌شود مانند استفاده از برخی مواد افزودنی شیمیایی مانند کاهنده آب (پروویس و وان دوندتر، ۲۰۱۳). بنابراین، علاوه بر روش‌های متداول، باید روش‌های خاصی برای سرکوب گسترش واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های فعال شده با قلیا توسعه یابد. همچنین، باید توجه داشت که مانند بسیاری از مناطق، دسترسی به سنگدانه‌های غیر واکنش‌پذیر، دشوار و غیر اقتصادی است. بنابراین، در ادامه، دیگر به بحث در مورد این روش نمی‌پردازیم (وانگ و نوگاچی، ۲۰۲۰: ۱۱۹-۱۰۵). علاوه بر این، با توجه به گستردگی توزیع سنگدانه‌های سبک‌وزن و تاثیر مؤثر بر کاهش روند رشد واکنش قلیایی سیلیسی، ترکیب سنگدانه‌های سبک‌وزن می‌تواند پتانسیل وقوع واکنش قلیایی سیلیسی را در مخلوط‌های فعال شده با قلیا، سرکوب کند، حتی تأثیر مثبت بر عملکرد

^۱. Multon

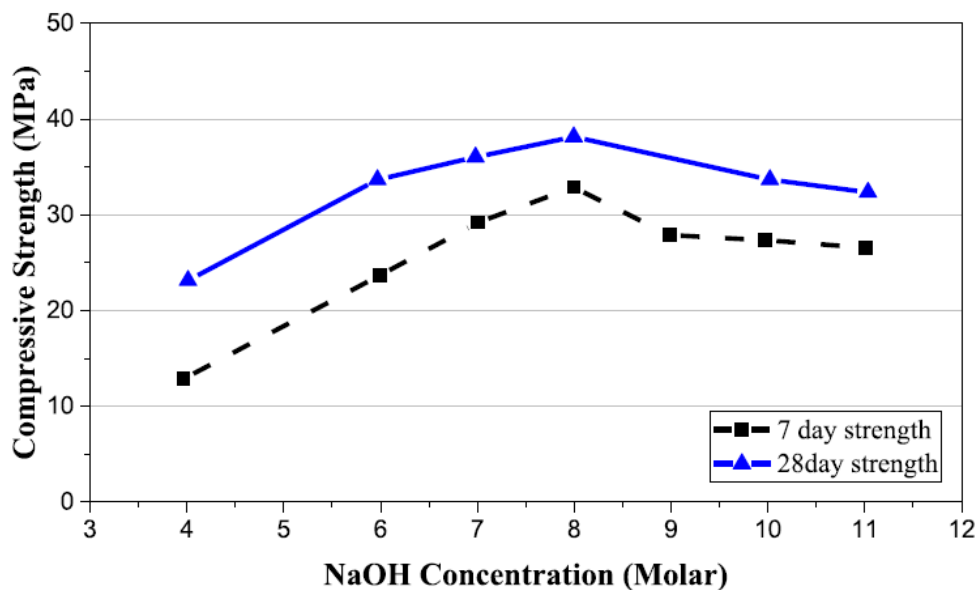
این مخلوط‌ها داشته است (لی و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۴-۱۳). مهم‌ترین اقدامات موثر برای کنترل واکنش قلیایی سیلیسی عبارتند از:

الف) محدود کردن قلیایت

تمامی سیمان‌های پرتلند تجاری، شامل مقداری قلیایی معادل از مواد خام اولیه در فرایند تولید در کارخانه می‌باشند. از این‌رو استاندارد *ASTM C105* (۲۰۲۰)، مقدار مجاز قلیایی سیمان را برای جلوگیری از واکنش قلیایی سیلیسی به ۰/۶ درصد وزن سیمان محدود کرده است. اصطلاحاً به این نوع از سیمان‌ها، سیمان کم‌قلیا نیز گفته می‌شود. در استاندارد مذکور اشاره شده است که واکنش قلیایی سیلیسی در بتن‌هایی که از سیمان کم‌قلیا استفاده شده است، رخ نمی‌دهد. اگرچه، در تحقیقات متعددی نشان داده شده است که حتی در بتن با سیمان کم‌قلیا نیز واکنش رخ می‌دهد (گیبسون^۱ و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۴۵-۵۳۷). در واقع می‌توان عنوان نمود، مقدار قلیایی سیمان عاملی مهم و ضروری اما تعیین‌کننده نیست. زیرا در شرایطی که حتی مقدار قلیایی نیز به مقدار استاندارد کاهش داده شده، واکنش رخ داده و اثرات مخربی داشته است (همان). علاوه بر این روش برای مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی مؤثر است، اما وقتی صحبت از مخلوط‌های فعال شده با قلیا می‌شود از آن‌جا برای فعال‌سازی مواد پایه به محلول قلیایی بالا نیاز است، این روش مناسب نیست. با این حال، مفهوم این روش را می‌توان با کنترل "حداکثر تأثیر" مقدار غلظت یا مدول فعال‌کننده‌های قلیایی پذیرفت. در واقع، هنگامی که مقدار غلظت یا مدول فعال‌کننده‌ها کمتر از حد مشخصی باشد، خواص مکانیکی و دوام در مخلوط‌های فعال شده با قلیا با افزایش مقدار غلظت یا مدول فعال‌کننده‌ها بهبود می‌یابد. در مقابل، هنگامی که میزان مصرف فعال‌کننده از آن حد معین، فراتر می‌رود با افزایش مقدار غلظت یا مدول فعال‌کننده، خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های فعال شده با قلیا کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است. (ویلیامسون و جوئنگر^۲، ۲۰۱۶: ۱۳۰-۱۲۴) با استفاده از غلظت‌های مختلف محلول سود (سدیم‌هیدروکسید)، نشان دادند هنگامی که غلظت محلول هشت مولار است، در این حالت مقدار مقاومت فشاری حداکثر بوده و با افزایش غلظت از مقدار مذکور، کاهش مقاومت فشاری رخ می‌دهد. بنابراین، می‌توان از این "میزان بهینه" برای کنترل محتوای قلیایی در مخلوط‌های فعال شده با قلیا استفاده کرد و در نتیجه به کاهش اثر واکنش قلیایی سیلیسی و سود اقتصادی بیشتر دست یافت.

¹. *Giebson*

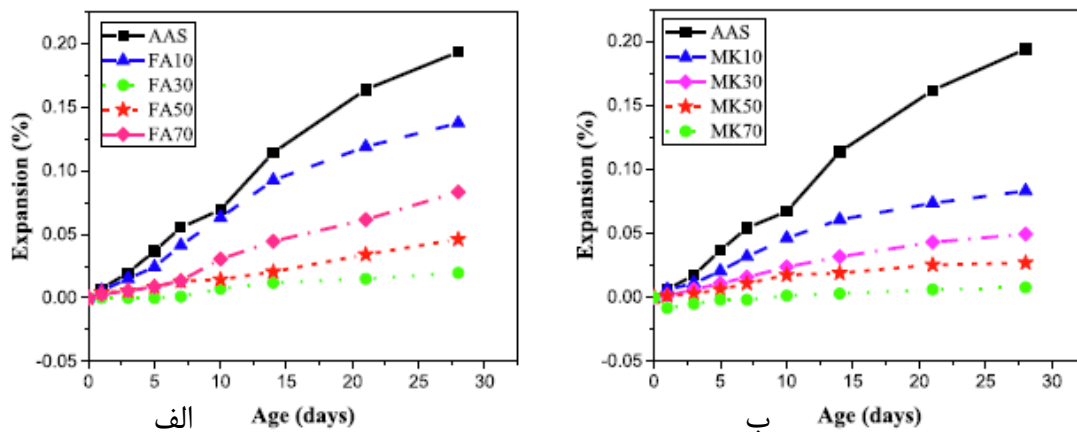
². *Williamson & Juenger*



شکل ۲-۱۷ تأثیر غلظت محلول سود بر مقاومت فشاری (ویلیامسون و جوئنگر، ۲۰۱۶)

ب) استفاده از مواد مکمل سیمانی

امروزه، جایگزینی مواد مکمل سیمانی به جای سیمان پرتلند معمولی تا حدی نه تنها می‌تواند واکنش قلیایی سیلیسی را در سازه‌های بتنی کاهش دهد، بلکه سایر مشخصات بتن را نیز بهبود می‌بخشد، به همین دلیل، مقرون به صرفه‌ترین و کاربردی‌ترین روش برای دستیابی به این هدف بوده است (توماس، ۲۰۱۱: ۱۲۳۱-۱۲۲۴). تأثیر مواد مکمل سیمانی بر کاهش واکنش قلیایی سیلیسی عمدتاً از طریق اثرگذاری مثبت این مواد بر واکنش مذکور از طریق کاهش قلیائیت محلول‌های منافذی در بتن، کم‌بودن میزان کلسیم در آن و زیاد بودن محتوای آلومینیوم این مواد است. مواد مکمل سیمانی با اتصال به قلیائیت محلول منافذ و همچنین مصرف بیشتر کلسیم هیدروکسید، بر واکنش قلیایی سیلیسی اثر می‌کنند (شفاعتیان و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۵۳-۱۴۳). همانطور که در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است، شی و همکاران (شی و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۹-۱۰) به بررسی تأثیر خاکستر بادی و متاکائولین بر واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد خاکستر بادی و متاکائولین می‌توانند انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی را کاهش دهند. علاوه بر این، همانطور که در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است، برای اثرگذاری بیشتر، باید مقدار بهینه‌ای از خاکستر بادی را جایگزین نمود، اما در خصوص متاکائولین برخلاف خاکستر بادی، با افزایش سطح جایگزینی آن، اثرگذاری مثبت در سرکوب واکنش قلیایی سیلیسی بیشتر می‌شود.



شکل ۲-۱۸ انبساط ملات‌های سرباره‌ای فعال‌شده با قلیا حاوی: الف) خاکستر بادی ب) متاکائولین (شی و همکاران، ۲۰۱۸).

کریونکو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تأثیر استفاده از متاکائولین بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی و فرآیند تشکیل ساختار مرزی بین سنگدانه و ملات، در بتن‌های مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن متاکائولین به سرباره فعال‌شده با قلیا، می‌تواند ساختار مرزی بین سنگدانه و ملات (*ITZ*) را تغییر و با اتصال به ژل ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی از طریق تشکیل هیدرات‌های آلومینوسیلیکات قلیایی، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی را کاهش دهد. بنابراین، برخی از مکمل‌های سیمانی غنی از آلومینیوم، نه تنها برای کاهش انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی استفاده می‌شود، بلکه ممکن است برای مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا نیز مفید باشند. با این حال، به دلیل کمبود اطلاعات از مکانیسم‌های پیچیده این زمینه نیاز به مطالعات بیشتری است.

ج) استفاده از مواد افزودنی

از سال ۱۹۵۱ هنگامی که مک کوی و کالدول^۱ (۱۹۵۱) در آزمایش‌های خود، با هدف کنترل انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در بتن، از بیش از ۲۰۰ ماده استفاده کردند. مکانیسم کنترل از طریق مواد افزودنی شیمیایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع بویژه برای لیتیم نیترات ($LiNO_3$) (کولینز^۲ و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۴۱۵-۱۴۰۳؛ فنگ و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۷۹۶-۱۷۸۹)، مواد غنی از آلومینیوم (شفاعتیان، ۲۰۱۲؛ های و استرتاگ^۳، ۲۰۱۹: ۸۷۹-۸۶۴) و عامل جذب هوا (بروب^۴ و همکاران، ۲۰۰۲: ۳۰۰-۲۸۹) محسوس است. همانطور که در شکل ۲-۱۹، نشان داده شده است، افزودن $LiNO_3$ ، یک لایه محافظ کریستالی $Li-Si$ بر روی سطح سنگدانه‌های واکنش‌پذیر ایجاد می‌کند که این پدیده می‌تواند مانع از حل شدن بیشتر سیلیس شود و منجر به جایگزینی کلسیم موجود در ژل واکنش قلیایی سیلیسی شده تا یک ژل واکنش قلیایی سیلیسی کم کلسیم ایجاد شود. بر اساس بررسی‌ها، این ژل دارای انبساط کم و ویسکوزیته زیاد است (فنگ و همکاران، ۲۰۱۰: ۶۴۲-

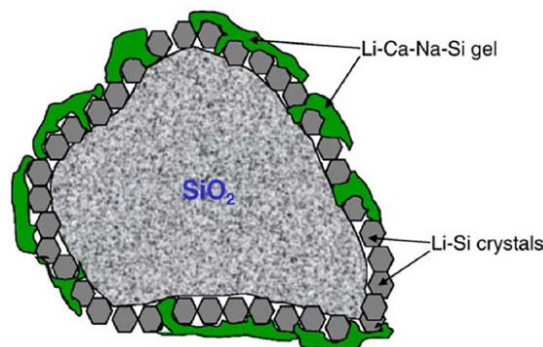
^۱. McCoy & Caldwell

^۲. Collins

^۳. Hay & Ostertag

^۴. Bérubé

(۶۳۶). همچنین این ژل در حضور آلومینیوم فعال، می‌تواند مانعی در سطح سنگدانه‌ها ایجاد نماید. علاوه بر این، می‌تواند با $C-S-H$ واکنش داده و $C-A-S-H$ تولید کند که دارای قابلیت اتصال قلیایی مناسبی است (شفاعتیان، ۲۰۱۲). علاوه بر این، استفاده از مقدار کمی از عامل جذب کننده هوا؛ می‌تواند منافذ بسته‌ای را در بتن ایجاد کرده و تنش ناشی از تورم ژل واکنش قلیایی سیلیسی را کاهش دهد (جنسن و همکاران، ۱۹۸۴: ۳۱۴-۳۱۱).



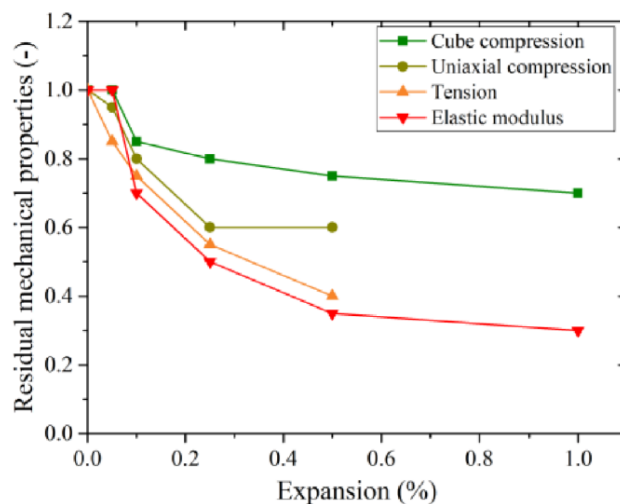
شکل ۲-۱۹ تصویر شماتیک از واکنش قلیایی سیلیسی در حضور $LiNO_3$ (فنگ و همکاران، ۲۰۱۰)

به طور کلی هیچ روشی نمی‌تواند به بطور کامل در ساختار واکنش قلیایی سنگدانه نفوذ کند و مانعی برای انجام واکنش بین قلیایی‌ها و سیلیس فعال سنگدانه گردد، حتی اگر این کار تحت فشار زیادی اعمال شوند. اما از طرفی برای به حداقل رساندن آسیب به بتن و افزایش عمر مفید سازه تحت تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی، استفاده از اپوکسی‌ها و رزین‌ها جهت آب‌بندی سطوح بتن، برش شکاف، پرکردن ترک و غیره برای به تعویق انداختن پیشرفت واکنش قلیایی سنگدانه موثر است. تا اینکه خود واکنش را خاتمه دهد. ضمناً چنین روش‌هایی اغلب اوقات پرهزینه هستند (فومیر^۱ و همکاران، ۲۰۱۰؛ مورائس نوس، ۲۰۱۶).

۲-۱۳. اثر واکنش قلیایی سیلیسی بر مشخصات مکانیکی بتن و پتانسیل استفاده از آن برای ارزیابی آن واکنش

تأثیر مشکلات دوامی بر مشخصه‌های مکانیکی امری انکارناپذیر است. واکنش قلیایی سیلیسی نیز به دلیل تأثیراتی که بر بتن می‌گذارد، قطعاً خواص مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۲-۲۰). قاعدتاً، قرائت تغییر طول نمی‌تواند شاخصی مناسب و قابل اعتماد برای نشان دادن میزان خرابی و تخریب داخلی بتن بر اثر واکنش باشد. بررسی مشخصه‌های مکانیکی در اثر رخداد واکنش قلیایی سیلیسی می‌تواند دید مناسبی از تأثیر واکنش بر ساختار داخلی و همچنین تضعیف داخلی بتن ارائه دهد.

^۱. Fournier



شکل ۲-۲ کاهش مشخصات مکانیکی بتن در اثر افزایش انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی (دونانت و سربونر^۱، ۲۰۱۶)

نتایج مطالعات مونیر^۲ و همکارانش (۲۰۱۸)، نشان داد میزان افت مقاومت فشاری متناسب با درجه واکنش پذیری سنگدانه است. همچنین ایشان، تأکید کردند که مقاومت فشاری در سنین اولیه به واکنش قلیایی سیلیسی حساس نبوده و چندان دستخوش تغییرات نمی‌شود. در سال ۲۰۱۵، اسلام و غفوری (۲۰۱۵) باهدف ارائه یک روش جدید برای ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی، در مطالعات خود از ۱۴ نوع سنگدانه مختلف با درجه‌های واکنش‌پذیری متفاوت استفاده کردند تا بتوانند ارتباط و همبستگی بین انبساط به دست آمده از نتایج دو آزمایش استاندارد *ASTM C1260* و اصلاح‌شده *ASTM C1293* با نتایج افت مقاومت فشاری نمونه‌ها ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی را بیابند. این محققین پی بردند که اگر میزان افت مقاومت فشاری در ۲۶ هفته بیش‌تر از ۸ درصد و یا مقاومت فشاری در همان سن ۲۶ هفته، مساوی و یا کم‌تر از مقاومت فشاری نمونه در ۴ هفته باشد، سنگدانه به عنوان واکنش‌پذیر شناخته می‌شود. اگرچه نتایج به دست آمده برای استفاده گسترده و به عنوان یک استاندارد، نیازمند تحقیقات بیش‌تر و آزمایش بر روی گونه‌های مختلف و متعددی از سنگدانه‌ها است، تا بتوان عیب و نقص احتمالی موجود در آن را برطرف ساخت. به صورت کلی می‌توان گفت اگرچه رفتار مقاومت فشاری تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی در سنین مختلف نامنظم است، اما تحت تأثیر قرار می‌گیرد و کاهش می‌یابد، که باز این کاهش وابسته به عوامل متعددی هستند از جمله این عوامل می‌توان به درجه واکنش‌پذیری سنگدانه، شرایط آزمایش، نوع و ابعاد نمونه و مدت آزمایش اشاره نمود. بر همین اساس، اسلام و غفوری (۲۰۱۵) در مطالعات خود دقیقاً همان ۱۴ نوع سنگدانه‌ای که در تحقیق قبلی برای ارزیابی مقاومت فشاری استفاده کرده‌اند، در پژوهشی دیگر به بررسی ارتباط بین مدول الاستیسیته و واکنش یادشده پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل تحلیلی خود نشان دادند سنگدانه‌هایی که درصد افت مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی ساخته شده از آن‌ها در سن ۲۶ هفته، بیش‌تر از ۱۸ درصد و یا تفاوت میان این پارامتر در سنین ۴ و ۲۶ هفته بیش‌تر از ۹

¹. Dunant & Scrivener

². Munir

درصد باشد، به عنوان واکنش پذیر شناخته می‌شوند. این محققین عنوان نمودند که هر دوی این معیارها، شاخص خوبی برای ارزیابی میزان واکنش پذیری قلیایی سنگدانه‌ها است. تحقیق مشابهی توسط گیاسو^۱ و همکاران (۲۰۰۸) که از شرایط مندرج در استاندارد *ASTM C1293* استفاده کرده بودند، صورت گرفت. نتایج کار ایشان نشان داد که میزان مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه‌هایی که با سنگ‌دانه‌ی غیر واکنش پذیر ساخته شده بودند، همواره در حال افزایش است. اما در مقابل، پارامتر مقاومت فشاری در نمونه‌هایی با سنگ‌دانه‌ی واکنش پذیر ساخته شده بودند، نوسان زیادی داشتند؛ به طوری که تا سنین میانه آزمایش، افزایش و در پایان آزمایش، با کاهش مقاومت مواجه‌اند. به نظر می‌رسد رفتار نوسانی مقاومت فشاری در اثر واکنش قلیایی سیلیسی به این علت است، که نرخ هیدراسیون در سنین اولیه زیاد و به تدریج کاهش می‌یابد و در طرف مقابل، نرخ واکنش قلیایی سیلیسی با گذشت زمان زیاد می‌شود. اما در طرف مقابل، مشاهده شد که مدول الاستیسیته‌ی نمونه‌های واکنش پذیر همواره کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، مدول الاستیسیته با انبساط قرائت شده نمونه‌ها بیش‌ترین هم‌خوانی را دارد. در واقع مدول الاستیسیته حساسیت زیادی نسبت به پیشرفت واکنش دارد.

یکی از مهم‌ترین نتایج حاصل شده از کار این محققین، بررسی تفاوت بین انبساط و مشخصه‌های مکانیکی بتن‌های مورد بررسی بود. آن‌ها نشان دادند نمونه‌هایی که انبساط آن‌ها حدوداً برابر بوده (یعنی براساس آزمایش تغییر طول، مقدار واکنش پذیری آن‌ها یکسان بوده و در یک دسته، مثلاً بسیار واکنش پذیر، قرار می‌گیرند)، میزان مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته متفاوتی نشان داده‌اند (به عبارت دیگر میزان افت ویژگی‌های آن‌ها با هم برابر نیست). از این مشاهده می‌توان نتیجه گرفت تغییر طول نمونه‌ها نمی‌تواند شاخص دقیقی برای نشان دادن تأثیر واکنش بر ساختار داخلی (آسیب داخلی بتن به دلیل رخداد واکنش قلیایی سیلیسی) و مشخصات مکانیکی باشد و برای نمونه‌هایی با میزان انبساط برابر، تأثیر واکنش بر مشخصه‌های مکانیکی متفاوت است.

این موضوع یکی از مشکلاتی است که توسط محققین متعددی بیان شده و یکی از معایب مقاومت فشاری نسبت به مدول الاستیسیته است. زیرا مدول الاستیسیته حتی در سنین بسیار کم نیز با کم‌ترین تغییر در پیشرفت واکنش تحت تأثیر قرار می‌گیرد (محمدی و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده بیانگر آن هستند که مدول الاستیسیته به خوبی می‌تواند شاخص مناسبی برای تعیین میزان اثر واکنش قلیایی سیلیسی بر بتن و همچنین میزان خرابی داخلی ایجاد شده در آن باشد. باربوسا^۲ و همکاران (۲۰۱۸)، تیرهای بتنی پیش تنیده را تا ۷/۵ سال در معرض شرایط واکنش قلیایی سیلیسی قرار دادند تا اثر درازمدت آن را بررسی کنند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که در پایان ۷/۵ سال، تمامی مشخصات مکانیکی بتن کاهش پیدا کرده‌اند، اگرچه این کاهش در مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت کششی بسیار قابل ملاحظه‌تر بود.

¹. Giaccio

². Barbosa

علاوه بر این، جهت ترک‌های ایجاد شده توسط واکنش، بر مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نیز تأثیرگذار است. در واقع، نیروی فشاری اعمال شده برای شکست نمونه‌ها در دو حالت موازی و عمود بر ترک‌های ایجاد شده، مقادیر متفاوتی است. بعنوان مثال، برای نمونه‌های بتنی، مقاومت فشاری در حالتی که نیرو موازی با ترک‌ها اعمال می‌شود به طرز قابل ملاحظه‌ای از حالتی که نیرو عمود بر ترک وارد می‌شود، بیش‌تر است (بن‌هاها^۱، ۲۰۰۶). دقیقاً یکی از معضلاتی که در مقاومت فشاری نمونه‌ها وجود دارد، مغایرت نتایج در طرح‌های یکسان است. قاعدتاً، یکی از دلایل این پدیده، نحوه‌ی بارگذاری و وضعیت آن نسبت به ترک‌های ایجاد شده است که در مطالعات مختلف متفاوت بوده و این موضوع باعث شده نمونه‌ها نسبت به نیروی وارد شده رفتارهای متفاوتی داشته باشند و در نتیجه نتایج نیز متفاوت خواهند بود (باربوسا و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۵۱-۴۴۰؛ مورنون^۲ و همکاران، ۲۰۱۷: ۷۴-۵۸). در تحقیق جامعی که به منظور بررسی ارتباط واکنش قلیایی سیلیسی و مشخصات مکانیکی انجام شد، از روی نتایج آنالیز SEM مشخص شد که وقوع واکنش قلیایی سیلیسی به دلیل ایجاد تخلخل بیش‌تر در بتن، باعث افت مشخصات مکانیکی شده و در بین آن‌ها، مقاومت کششی بتن بیش‌ترین حساسیت یا کاهش مقاومت را داشته است، به طوری که بیش‌ترین کاهش در ۳ روز اول رخ داده است (اس مائویی^۳ و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۱۲-۲۰۳). لی و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای جامع به ارزیابی تعدادی از مشخصه‌های مکانیکی بتن در اثر واکنش قلیایی سیلیسی پرداختند. آن‌ها از سه نوع سنگ‌دانه با سه درجه واکنش‌پذیری متفاوت برای نشان دادن مشخصه‌های بتن حین مواجهه با واکنش قلیایی سیلیسی استفاده کردند. از نتایج کلی پژوهش آن‌ها می‌توان پی برد که مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و کششی بیش‌ترین تأثیرپذیری را از واکنش دارد. نتایج ذکر شده تأیید کرده‌اند که مقاومت فشاری طبق موارد ذکر شده در بالا دارای رفتار نوسانی و نامنظم بوده و نمی‌تواند به خوبی نماینگر خرابی داخلی بتن باشد.

یکی از مشکلات عمده در حوزه‌ی واکنش قلیایی سیلیسی، عدم وجود آزمایش قابل اعتماد برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگدانه‌هاست. پر واضح است آزمایش‌های کنونی، هر کدام معایب و نواقصی دارند. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان به این نتیجه رسید که مشخصه‌هایی همچون مدول الاستیسیته و مقاومت کششی که بیش‌ترین حساسیت را نسبت به واکنش قلیایی سیلیسی دارند، می‌توانند معیار مناسب و قابل اعتمادی برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها باشند. تحقیقات دیگری نیز نشان داده‌اند که روش‌های غیرمستقیم نظیر آزمایش آسیب سختی، شاخص نرخ آسیب و شاخص تغییر شکل پلاستیک، پتانسیل بسیار خوبی دارند که به عنوان یک روش برای ارزیابی واکنش مورد استفاده قرار بگیرند (سانچز^۴ و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۱۸۸-۱۱۷۸؛ ۲۰۱۵: ۳۲-۲۰).

¹. Ben Haha
². Morenon
³. Smaoui
⁴. Sanchez

۲- ۱۴. جمع‌بندی

به‌طور کلی مطالعات واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های مبتنی بر مواد سیمانی فعال‌شده با قلیا نسبت به مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی کمتر بوده است و همیشه نتایج متناقض بوده است. واکنش قلیایی سنگدانه در مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا می‌تواند باعث انبساط مخرب گردد. واکنش مذکور در مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا، تحت تأثیر عوامل زیادی مانند ماهیت و میزان فعال‌سازها، نوع ماده پایه، درجه واکنش‌پذیری سنگدانه‌های ناسالم و روش‌های آزمایش قرار می‌گیرد. برای درک بهتر، از رفتار مخلوط‌های فعال‌شده با مواد قلیایی، باید ترکیبی از چندین عامل مانند مدول سیلیکات و محتوای قلیایی در مطالعات نظر گرفته شود. زیرا بررسی تنها یک عامل نمی‌تواند نتایج معتبر و قابل اعتماد ارائه کند. علاوه بر این، از آنجا که همه این روش‌ها جهت ارزیابی واکنش قلیایی سنگدانه مخلوط‌های تهیه شده از سیمان پرتلند معمولی پیشنهاد شده‌اند، استفاده از این روش‌ها به‌طور مستقیم بر روی مواد قلیایی فعال می‌تواند به دلیل محتوای قلیایی بالا و کلسیم کم در مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا مشکل‌ساز شود. از آنجایی که واکنش قلیایی سیلیسی به دلیل تخریب ساختار داخلی بتن و اثری که بر آن می‌گذارد به راحتی می‌تواند مشخصه‌های مکانیکی بتن را تحت تأثیر قرار دهد. بیش‌تر تحقیقات پیشین، اثرپذیری و کاهش مشخصه‌های مکانیکی را ناشی از پیشرفت و تشکیل ژل واکنش قلیایی سیلیسی تأیید کرده‌اند. این اثرپذیری سبب شد که عده‌ای دیگر از محققین به دنبال یافتن ارتباط و هم‌بستگی بین پیشرفت واکنش قلیایی سیلیسی و میزان کاهش و اثرپذیری مشخصه‌های مکانیکی باشند. روش‌های مختلفی نیز ارائه شده، اما تاکنون نتوانسته طیف وسیعی از سنگدانه‌ها را مورد آزمایش قرار دهد و بتواند از آن به عنوان روشی استاندارد و جامع استفاده کنند. با توجه به میزان هم‌بستگی میان واکنش و مشخصه‌های بتن می‌توان انتظار داشت که روشی جامع براساس آن‌ها ایجاد کرد.

فصل سوم:

مواد، مصالح و برنامه آزمایشگاهی

۳-۱. مقدمه

با توجه به اهداف این پژوهش اقدام به مساعد نمودن شرایط برای وقوع واکنش قلیایی سیلیسی شده است. عموماً سه عامل برای رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی شناخته شده است. این عوامل عبارتند از سنگدانه واکنش پذیر (وجود سیلیس فعال)، قلیایی بالا موجود در سیمان و رطوبت کافی در بتن. در این پژوهش نحوه ساخت، عمل آوری و نگهداری مخلوط‌های ملاتی و بتنی به ترتیب براساس دستورالعمل مندرج در آزمایش استاندارد *ASTM C1260* و *ASTM C1293* تسریع یافته انجام شده است. موضوع حائز اهمیت در استانداردهای مذکور نحوی عمل آوری و نگهداری مخلوط‌های ساخته شده می‌باشد. به بیان دیگر، براساس شرایط مندرج در استانداردهای مذکور عوامل موثر در وقوع واکنش قلیایی سیلیسی فراهم شده است.

در این فصل به معرفی مواد، مصالح و برنامه آزمایشگاهی استفاده شده در پژوهش حاضر، پرداخته شده است. در ابتدای کار، مواد و مصالح مورد استفاده (مصالح سنگی، سرباره، آب و مواد قلیایی) و سپس برنامه آزمایشگاهی معرفی و بیان شده است.

۳-۲. معرفی مواد و مصالح مصرفی

۳-۲-۱. مصالح سنگی

سنگدانه‌های استفاده شده برای ساخت ملات و بتن یکسان بوده است. مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی در جدول ۳-۱ ارائه شده است. با توجه به اهمیت پتانسل واکنش پذیری سنگدانه‌ها در واکنش قلیایی سیلیسی، در این پژوهش سنگدانه‌های مصرفی در تمامی مخلوط‌ها، بسیار واکنش پذیر و از یک معدن در استان آذربایجان شرقی تهیه شده است. واکنش پذیر بودن این سنگدانه بر اساس نتایج آزمایش استاندارد *ASTM C1260* و *ASTM C1293* تسریع یافته، اثبات شده است که نتایج آن در فصل چهارم ارائه شده است.

برای دانه بندی سنگدانه‌های مصرفی در ساخت نمونه‌های ملاتی، دقیقاً براساس دانه بندی مندرج در آزمایش استاندارد *ASTM C1260*، مطابق جدول ۳-۳ صورت گرفته شده است و دانه بندی سنگدانه‌های مصرفی در ساخت نمونه‌های بتنی براساس دانه بندی مندرج در آزمایش استاندارد *ASTM C1293*، مطابق جدول ۳-۳ انجام شده است.

جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی

سنگدانه	چگالی (gr/cm^3)	جذب آب (درصد)	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی مخلوط سنگدانه
ماسه	۲/۵۷	۲/۳	۱۹ میلی متر	۴/۹
شن	۲/۵۶	۱/۷۵		

جدول ۲-۳ مشخصات دانه بندی مصالح سنگی در نمونه های ملات مطابق با استاندارد ASTM C1260

وزن (درصد)	شماره الک	
	مانده روی	عبوری از
۱۰	الک شماره ۸ (۲/۳۶ میلی متر)	الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی متر)
۲۵	الک شماره ۱۶ (۱/۱۸ میلی متر)	الک شماره ۸ (۲/۳۶ میلی متر)
۲۵	الک شماره ۳۰ (۰/۶ میلی متر)	الک شماره ۱۶ (۱/۱۸ میلی متر)
۲۵	الک شماره ۵۰ (۰/۳ میلی متر)	الک شماره ۳۰ (۰/۶ میلی متر)
۱۵	الک شماره ۱۰۰ (۰/۱۵ میلی متر)	الک شماره ۵۰ (۰/۳ میلی متر)

جدول ۳-۳ مشخصات دانه بندی مصالح سنگی در نمونه های بتن مطابق با استاندارد ASTM C1293

وزن (درصد)	شماره الک	
	مانده روی	عبوری از
۳۳	الک ۱/۲ اینچ (۱۲/۵ میلی متر)	الک ۳/۴ اینچ (۱۹ میلی متر)
۳۳	الک ۳/۸ اینچ (۹/۵ میلی متر)	الک ۱/۲ اینچ (۱۲/۵ میلی متر)
۳۳	الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی متر)	الک ۳/۸ اینچ (۹/۵ میلی متر)

۳-۲-۲. ماده سیمانی

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ دو شرکت سیمان هگمتان همدان در طرح های شاهد و از سرباره بدست آمده از کوره آهن گدازی (تهیه شده از سیمان مدائن اصفهان)، به عنوان ماده پایه (منبع سیلیکات آلومینیومی) و جایگزین سیمان جهت ساخت مخلوط های فعال شده با قلیا استفاده شده است. مشخصات و خصوصیات سیمان پرتلند و سرباره مصرف شده در ساخت مخلوط های ملات و بتن، در جدول ۳-۴ نمایش داده شده است. سرباره مورد استفاده در پژوهش از نوع سرباره کوره بلند آهن گدازی، محصول شرکت فولاد اصفهان است. خواص فیزیکی اعلام شده از کارخانه به این شرح است: وزن مخصوص ۲/۹ گرم بر سانتی متر مکعب، سطح مخصوص ۴۰۰۰ تا ۴۲۰۰ سانتی متر مربع بر گرم شاخص فعالیت سرباره ۸۰ است. ساختار شیمیایی و نتایج آزمون *XRD* برای سیمان و سرباره به گرم در جدول ۱-۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳-۴ مشخصات و خصوصیات مواد سیمانی مصرفی طبق نتایج آزمون XRD

مواد چسباننده		
سرباره	سیمان پرتلند	اکسیدهای اصلی
۳۷/۹	۶۳/۵۴	اکسید کلسیم (درصد) (CaO)
۳۵/۹	۲۱/۴۴	سیلیس (درصد) (SiO_2)
۸/۹	۱/۴۸	اکسید منیزیم (درصد) (MgO)
۸/۴	۴/۵۲	اکسید آلومینیوم (درصد) (Al_2O_3)
۰/۶	۳/۶۹	اکسید آهن (درصد) (Fe_2O_3)
۰/۷	۲/۲۶	اکسید سولفات (درصد) (SO_3)
۰/۷	۰/۷۲	اکسید پتاسیم (درصد) (K_2O)
۰/۳	۰/۵۲	اکسید سدیم (درصد) (Na_2O)
۱/۹	۰/۱۵	اکسید تیتانیوم (درصد) (TiO_2)
۰/۰۱ <	۰/۰۵	اکسید فسفر (درصد) (P_2O_5)
۰/۹	۱/۴	LOI (درصد)
۲/۹	۳/۱۲	وزن مخصوص
۴۱۰۰	۳۳۵۰	(سانتی متر مربع بر گرم (نرمی)

۳-۲-۳. آب مصرفی

آبی که برای ساخت بتن استفاده می‌شود باید تمیز و عاری از مواد زیان آور نظیر روغن‌ها، اسیدها، بازها، نمک‌ها و مواد آلی و قندی باشد. به‌طور کلی مصرف آب آشامیدنی برای ساخت و عمل‌آوری بتن مناسب است. در این پژوهش از آب آشامیدنی شهرستان کبودرآهنگ استفاده شده است.

۳-۲-۴. ماده فعال ساز قلیایی

محلول‌های قلیایی استفاده شده برای ساخت مخلوط‌های فعال شده با قلیا (مخلوط‌های ژئوپلیمری) در این پژوهش، متشکل از آب‌شیشه (سیلیکات سدیم) با مدول (نسبت اکسید سدیم به اکسید سیلیس) برابر با ۲/۰۷ و محلول سود (هیدروکسید سدیم) با مولاریته ۸ به عنوان فعال‌ساز قلیایی استفاده شده است. جهت فعال‌سازی سرباره کوره آهن‌گدازی (مواد پایه‌ای) در ساخت مخلوط‌های فعال شده با قلیا، در این پژوهش ماده فعال‌ساز از ترکیب دو محلول فعال‌ساز قلیایی ذکر شده به میزان برابر (یعنی نسبت یکسان محلول سود و آب‌شیشه) تشکیل شده است.

۳-۲-۴-۱. سدیم هیدروکسید (محلول سود)

همان‌طور که گفته شد از محلول سدیم هیدروکسید (محلول سود) با غلظت ۸ مولار به عنوان یکی از فعال‌سازهای قلیایی در ساخت مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا استفاده شده

است. برای ساخت محلول مذکور، کیسه‌های ۲۵ کیلویی سود پرک جامد با چگالی جامد برابر با ۲/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تهیه و جهت دستیابی به محلول ۸ مولار با آب حل شده است. نحوه تهیه محلول سود به این صورت است که ابتدا به‌منظور تعیین مقدار سود جامد در یک لیتر محلول، مولاریته مدنظر در عدد اتمی سدیم هیدروکسید (برابر با ۴۰) ضرب می‌شود، سپس به آن آب اضافه می‌شود تا حجم محلول به یک لیتر برسد و در نهایت با توزین محلول، می‌توان درصد وزنی سدیم هیدروکسید جامد در هر لیتر محلول سود را به دست آورد. با توجه به گرماده بودن این محلول، قبل از ساخت مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، این محلول به منظور سرد شدن کامل، ۲۴ ساعت قبل از استفاده تهیه شده است. اما برای محاسبه مقدار مواد جامد موجود در محلول سود ۸ مولار با توجه به روابط استوکیومتری در شیمی در درصد وزنی سدیم هیدروکسید جامد در هر لیتر محلول سود ۰/۲۶۲۳ در نظر گرفته شده است. به بیان دیگر هر لیتر محلول سود ۸ مولار، از ۰/۲۶۲۳ درصد وزنی، سود جامد تشکیل شده است.

این ماده قلیایی (سود پرک) در تماس با چشم، پوست و استنشاق فرد را دچار آسیب می‌کند. و تماس سود با کلیه قسمت‌های بدن خطرناک بوده و تماس با آن فرد را دچار سوزش، تاول، سوختگی، التهاب، کوتاهی تنفس و سرفه‌های شدید می‌کند. در نتیجه لازم است هنگام استفاده از این ماده قلیایی از لباس‌های آستین دار، دست‌کش لاستیکی، کلاه لبه‌دار، پوشش محافظ صورت و گردن حتماً استفاده گردد.

۳-۲-۴. سیلیکات سدیم (آب شیشه)

سیلیکات سدیم (آب شیشه) که محلولی متشکل از Na_2O ، SiO_2 و آب می‌باشد. محلول سیلیکا-سدیم تهیه شده در این پژوهش، از ۴۷ درصد آب و ۵۳ درصد مواد جامد تشکیل شده است. مشخصات سیلیکات سدیم تهیه شده به منظور ساخت خمیر سیمان ژئوپلیمری در جدول ۳-۵ ارائه شده است. مدول سیلیکات سدیم نسبت SiO_2 به Na_2O موجود در این محلول می‌باشد. محلول سیلیکات سدیم مورد استفاده در به صورت گالن ۲۰ لیتری تهیه گردیده است.

جدول ۳-۵ مشخصات سیلیکات سدیم (آب شیشه)

چگالی جامد (gr/cm^3)	چگالی مایع (gr/cm^3)	PH	رنگ	درصد آب موجود	مدول آب شیشه $[\frac{SiO_2}{Na_2O}]$
۲/۴	۱/۵۶	۱۱-۱۳	شفاف	۴۷٪	۲/۳-۲/۴

۳-۳. نسبت‌های موثر بر خواص بتن‌های فعال شده قلیایی

۳-۳-۱. نسبت آب به مواد چسباننده قلیایی

این پارامتر نسبت مجموع آب موجود در بتن اعم از آب موجود در سیلیکات‌سدیم و هیدروکسید سدیم و هرگونه آب آزاد اضافی در بتن به مجموع مقدار ماده پایه، مقدار ماده جامد موجود در محلول هیدروکسیدسدیم و مقدار ماده جامد موجود در سیلیکات‌سدیم اطلاق می‌گردد. در واقع نسبت آب به مواد چسباننده در بتن‌های فعال شده با قلیا (ژئوپلیمرها) همانند تاثیر نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلندی است. مقدار ماده جامد موجود در محلول‌های فعال‌ساز در ابتدا با استناد به اطلاعات تولیدکننده و انطباق آن با نتایج درصد ماده خشک هر ماده بررسی شده است و در این نسبت قرار گرفته است. توضیحات محاسبه مقدار آب و ماده جامد موجود در فعال‌سازهای استفاده شده در این پژوهش در بخش ۳-۲-۴-۱ و ۳-۲-۴-۲ ارائه شده است. در این پژوهش برای ساخت کلیه طرح‌های ملات و بتن (اعم از مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلندی و یا سرباره فعال شده با قلیا)، نسبت آب به مواد چسباننده ۰/۴۷ در نظر گرفته شده است.

۳-۳-۲. نسبت وزنی محلول قلیایی به سرباره

در این تحقیق از دو محلول هیدروکسیدسدیم و سیلیکات‌سدیم برای تهیه محلول فعال‌کننده قلیایی سیلیکاتی استفاده شده است. یکی از پارامترهای موثر بر خواص تازه و سخت شده مخلوط‌های فعال شده با قلیا، نسبت مقدار محلول قلیایی (فعال‌ساز) به مقدار ماده پایه‌ای (در این پژوهش سرباره کوره آهن‌گدازی) در مخلوط‌های فعال شده با قلیا (ژئوپلیمر) است. در واقع به صورت این نسبت، مقدار وزنی محلول قلیایی (فارغ از غلظت و مولاریته) به مقدار ماده پایه (نه مواد چسباننده) درباره این نسبت بیشتر در حوزه کارایی بتن بحث گردیده است. اما تغییر مقدار آن بر مقاومت فشاری بتن فعال شده قلیایی نه به اندازه نسبت آب به مواد چسباننده اما در نوع خود تأثیر گذار است. نکته حائز اهمیت در مخلوط‌های فعل شده با قلیا بهینه بودن این پارامتر است. افزایش مقدار محلول فعال‌کننده با ثابت بودن مقدار سرباره باعث افزایش روانی بتن و کاهش بیش از اندازه آن نیز باعث افت شدید روانی و کارایی می‌گردد.

در این پژوهش هریک از مخلوط‌های ملات و بتن، مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا از چهار طرح ساخته شده است. تمایز هریک از این طرح‌ها در نسبت محلول قلیایی به سرباره است. به همین منظور چهار نسبت ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است برای همسان نمودن مشخصات ملات‌ها و بتن‌های متناظر به منظور مقایسه نتایج نسبت محلول قلیایی به سرباره در ملات و بتن، مشابه در نظر گرفته شد.

۳-۴. طرح‌های مخلوط

همان‌طور که قبلاً گفته شد جهت بررسی بیشتر هم از نمونه‌های ملاتی و هم از نمونه‌های بتنی ساخته شده است. در مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا از سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان ماده پایه (منبع آلومینوسیلیکاتی) و جایگزین سیمان و از ترکیب یکسان محلول قلیایی سدیم هیدرواکسید و محلول قلیایی سدیم سیلیکات به عنوان ماده فعال‌ساز ماده پایه (همان سرباره) استفاده شده است. در طرح مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا با توجه به نسبت محلول قلیایی به سرباره (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸) از یک‌دیگر متمایز می‌شوند. به طور کلی سعی شده است مشخصات خمیر ژئوپلیمری مخلوط‌های ملات و بتن مشابه ساخته شده باشد به همین منظور پارامترهای تأثیرگذار نظیر نسبت آب به مواد چسباننده، نسبت محلول فعال‌ساز به سرباره، نسبت محلول‌های فعال‌ساز و نوع سنگدانه مصرفی برای ساخت ملات و بتن یکسان در نظر گرفته شده است. اما جهت بررسی و کنترل عملکرد مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا نمونه‌های ملاتی و بتنی مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی تحت عنوان طرح کنترل یا همان طرح شاهد و یا طرح آزمایشگاهی ساخته شده است.

نحوه‌ی ساخت، عمل‌آوری و نگهداری مخلوط‌های ملاتی و بتنی به ترتیب براساس دستورالعمل مندرج در آزمایش استاندارد *ASTM C1260* و *ASTM C1293* تسریع‌یافته انجام شده است. با توجه به اهداف این پژوهش موضوع حائز اهمیت در استانداردهای مذکور نحوی عمل‌آوری و نگهداری مخلوط‌های ساخته شده می‌باشد. به همین منظور در ادامه به نسبت مخلوط و نحوی عمل‌آوری و نگهداری استانداردهای مذکور می‌پردازیم.

۳-۴-۱. ساخت و عمل‌آوری ملات طبق آزمایش استاندارد *ASTM C1260*

۳-۴-۱-۱. نسبت مخلوط ملات

همان‌طور که قبلاً گفته شده یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی مضر بودن مصالح سنگی در ایجاد واکنش قلیایی سیلیسی، طرح آزمایش استاندارد *ASTM C1260* است. ملات‌های ساخته شده طبق آزمایش مذکور مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی می‌باشد. بنابراین، با توجه به اهداف این پژوهش، برای ساخت ملات‌های شاهد (ملات‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی) مصالح دقیقاً طبق دستورالعمل آزمایش استاندارد *ASTM C1260* ترکیب شده است. طبق آزمایش استاندارد *ASTM C1260* برای ساخت هر سه نمونه ملات باید از یک قسمت سیمان پرتلند معمولی با عیار ۴۴۰ گرم و ۲/۲۵ قسمت سنگ‌دانه به مقدار ۹۹۰ گرم طبق دانه‌بندی تعیین در جدول ۳-۳ تشکیل شده باشد و با نسبت آب به سیمان ۰/۴۷ ملات روانی ساخت شود. در ساخت طرح شماره یک ملات (*Cement100*) به عنوان طرح کنترل یا همان طرح شاهد و یا طرح آزمایشگاهی با نسبت‌های گفته ساخته شده است.

برای ساخت مخلوط‌های ملات فعال شده با قلیا دقیقاً از همین دستورالعمل استفاده شده است اما با این تفاوت که مجموع سرباره کوره آهن‌گدازی و مواد جامد موجود در محلول‌های فعال‌ساز قلیایی

به عنوان مواد چسباننده جایگزین سیمان پرتلند معمولی در نظر گرفته شده است. و همچنین در مخلوط‌های ملات فعال شده با قلیا، نسبت آب کل (آب آزاد افزوده شده به مخلوط + آب موجود در محلول‌های فعال‌ساز قلیایی) به مواد چسباننده (سرباره کوره آهن‌گدازی + مواد جامد موجود در محلول‌های فعال‌ساز قلیایی)، ۰/۴۷ در نظر گرفته شده است. در واقع این نسبت همان نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی است.

۳-۴-۱-۲. عمل‌آوری و نگهداری ملات

برای عمل‌آوری و نگهداری ملات‌های ساخته شده دو محیط در نظر گرفته شده است. محیط آزمایشگاهی و محیط تشدید یافته، در محیط اول یک سری از کلیه طرح‌های ساخته شده نمونه‌های ساخته شده در مخزن حاوی آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس نگهداری می‌شود و در محیط تشدید یافته یک سری دیگر از کلیه طرح‌های ساخته شده، در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و غوطه‌ور در درون محلول قلیایی سدیم هیدرواکسید با غلظت یک مولار، طبق شرایط مندرج در استاندارد آزمایش استاندارد *ASTM C1260*، نگهداری و عمل‌آوری شده است. جدول ۳-۶ مشخصات کلی مخلوط‌های ملات ساخته شده طبق آزمایش استاندارد *ASTM C1260* ارائه شده است.

جدول ۳-۶ مشخصات طرح‌های ملاتی ساخته شده

شماره طرح ساخته شده	نوع مخلوط ساخته شده	نسبت آب به مواد چسباننده	نسبت سنگدانه به مواد چسباننده	نسبت محلول قلیایی به سرباره	شرایط عمل‌آوری و نگهداری ملات
۱	100 Cement	۰/۴۷	۲/۲۵	-	محیط تشدید یافته (تعریف شده در استاندارد <i>ASTM C1260</i>) و همچنین محیط آزمایشگاهی
۲	100 Slag	۰/۴۷	۲/۲۵	۰/۵	محیط تشدید یافته (تعریف شده در استاندارد <i>ASTM C1260</i>) و همچنین محیط آزمایشگاهی
۳	100 Slag	۰/۴۷	۲/۲۵	۰/۶	محیط تشدید یافته (تعریف شده در استاندارد <i>ASTM C1260</i>) و همچنین محیط آزمایشگاهی
۴	100 Slag	۰/۴۷	۲/۲۵	۰/۷	محیط تشدید یافته (تعریف شده در استاندارد <i>ASTM C1260</i>) و همچنین محیط آزمایشگاهی
۵	100 Slag	۰/۴۷	۲/۲۵	۰/۸	محیط تشدید یافته (تعریف شده در استاندارد <i>ASTM C1260</i>) و همچنین محیط آزمایشگاهی

۳-۴-۲. ساخت و عمل‌آوری بتن طبق آزمایش استاندارد *ASTM C1293*

۳-۴-۲-۱. نسبت مخلوط بتن

یکی دیگر از روش‌های معتبر و متداول یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی مضر بودن مصالح سنگی در ایجاد واکنش قلیایی سیلیسی، طرح آزمایش استاندارد *ASTM C1293* است. طبق آزمایش استاندارد *ASTM C1293* برای ساخت نمونه‌های بتنی باید عیار سیمان ۴۲۰ کیلوگرم باشد و نسبت آب به سیمان در محدوده ۰/۴۲ تا ۰/۴۵ باشد اما به‌منظور همسان نمودن نمونه‌های بتن با نمونه‌های

ملات، نسبت آب به سیمان ۰/۴۷، برای ساخت نمونه‌های بتن در نظر گرفته شده است. می‌بایست حجم سنگدانه مصرفی ۷۰ درصد حجم بتن در نظر گرفته شده است. نحوی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی تعیین شده در آزمایش استاندارد مذکور طبق جدول ۳-۴ انجام شده است.

به‌طور کلی شش طرح بتنی طبق روش آزمایش استاندارد *ASTM C1293* ساخته شده است. طرح اول و دوم به عنوان طرح‌های کنترل یا همان طرح شاهد و یا طرح آزمایشگاهی مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی ساخته شده است با توجه به اهداف پژوهش در ساخت طرح اول هیچ‌گونه مواد قلیایی افزوده شده است و تنها قلیایی طرح یک همان قلیایی موجود در سیمان پرتلند است. اما در ساخت طرح شاهد دوم طبق آزمایش استاندارد *ASTM C1293* برای مساعد نمودن شرایط وقوع واکنش قلیایی سیلیسی، ۱/۲۵ درصد قلیائیت معادل (Na_2O_e) در سیمان پرتلند مصرفی، سود ($NaOH$) اضافه می‌گردد.

طرح‌های مخلوط‌های بتنی مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا دقیقاً مشابه طرح‌های ملات بوده است. با توجه به این که از محلول قلیایی برای فعال‌سازی سرباره استفاده می‌شود. قلیائیت این نوع بتن‌ها چندین برابر بتن معمولی است در نتیجه نیازی نیست طبق آزمایش استاندارد *ASTM C1293* قلیائیت این نوع بتن‌ها را افزایش داد.

۳-۴-۲. عمل‌آوری و نگهداری بتن

همان عمل‌آوری و نگهداری ملات‌های ساخته شده برای بتن‌های ساخته شده نیز دو محیط در نظر گرفته شده است. محیط آزمایشگاهی و محیط تشدید یافته، در محیط اول دارای همان شرایط قبلی است نمونه‌های بتنی ساخته شده در مخزن حاوی آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس نگهداری می‌شوند. در محیط تشدید یافته آزمایش استاندارد *ASTM C1293* باید نمونه‌های بتنی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت بیش از ۹۵ درصد نگهداری و عمل‌آوری شوند است. جدول ۳-۷ مشخصات کلی مخلوط‌های بتنی ساخته شده ارائه شده است.

$$I. Na_2O_e = \% Na_2O + 0.6583 \% K_2O$$

جدول ۳-۷ مشخصات طرح‌های بتنی ساخته شده

طرح	نام طرح	نوع بتن	نسبت محلول فعال‌ساز به محلول قلیایی	شرایط نگهداری و عمل‌آوری
۱	PC-NA-W	فاقد مواد قلیایی	بتن معمولی (نمونه شاهد)	تنها در محیط آزمایشگاه (محلول آب و آهک اشباع با دمای ۲۳ درجه سلسیوس)
۲	PC-A-S	دارای مواد قلیایی (مقدار قلیایی ۱/۲۵ درصد وزن سیمان)	بتن معمولی (نمونه شاهد)	محیط تشدید یافته (تعریف شده در استاندارد ASTM C1293) و همچنین محیط آزمایشگاهی
۳	Salg-0.5-S	بتن فعال شده با قلیا	۰/۵	
۴	Slag-0.6-S	بتن فعال شده با قلیا	۰/۶	
۵	Slag-0.7-S	بتن فعال شده با قلیا	۰/۷	
۶	Salg-0.8-S	بتن فعال شده با قلیا	۰/۸	

۳-۴-۳. عملیات ساخت

با توجه به اینکه زمان گیرش اولیه مخلوط‌های بتنی و ملاتی مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا بسیار سریع است. ابتدا تمامی مصالح به جز آب آزاد و محلول‌های فعال‌ساز قلیایی، به ترتیب از اندازه درشت تا ریز در مخلوط کن ریخته شده است. سپس آب آزاد و محلول‌های فعال‌ساز در حین اختلاط به آرامی به مخلوط اضافه می‌گردد. پس از ساخت ملات برای هر نمونه، سه نمونه تهیه شده است. و نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها به این شرح است که، قالب را با ملات در دو لایه تقریباً مساوی پر می‌شود و هر لایه ملات را به وسیله میله ضربه‌زن با ۲۵ ضربه متراکم می‌گردد. ملات اضافی را با کاردک برداشته و سطح آن را با لبه بالایی قالب تراز می‌کنیم.

۳-۵. برنامه آزمایشگاهی

جدول ۳-۸ آزمایشات انجام شده، استانداردهای مورد نظر، برنامه زمانی آزمایش‌ها و ابعاد نمونه‌های ملاتی و بتنی مورد استفاده در انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۸ آزمایشات انجام شده، استانداردهای مورد نظر، برنامه زمانی آزمایش‌ها و ابعاد مخلوط‌ها تهیه شده

سن آزمایش	عمل‌آوری	آزمونه مورد استفاده	استاندارد	نوع نمونه	آزمایش
۲۸، ۱۴، ۷ (روز)	محیط تشدید یافته (مغروق در محلول یک مولار و دمای ۸۰ درجه)	مکعب مستطیلی به ابعاد ۲/۵×۲/۵×۲۸/۵ سانتی‌متری	آزمایش استاندارد ASTM C1260	ملات	تغییرات طول (انبساط)

سن آزمایش	عمل آوری	آزمونه مورد استفاده	استاندارد	نوع نمونه	آزمایش
هر دو هفته یک- بار	محیط آزمایشگاهی (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) محیط تشدید یافته (مخزن با رطوبت بالای ۹۵ درصد و دمای ۶۰ درجه)	مکعب مستطیلی به ابعاد ۷/۵×۷/۵×۳۰ سانتی متری	آزمایش تسریع یافته استاندارد ASTM C1293	بتن	
۲۸،۱۴،۷ (روز)	محیط آزمایشگاهی (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) محیط تشدید یافته (مغروق در محلول یک مولار و دمای ۸۰ درجه)	مکعب مستطیلی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متری	ISIRI ۳۲۰۶	ملات	
۶،۳،۱ (ماه)	محیط آزمایشگاهی (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) محیط تشدید یافته (مخزن با رطوبت بالای ۹۵ درصد و دمای ۶۰ درجه)	مکعب مستطیلی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متری	ISIRI ۳۲۰۶	بتن	مقاومت فشاری
۲۸،۱۴،۷ (روز)	محیط آزمایشگاهی (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) محیط تشدید یافته (مغروق در محلول یک مولار و دمای ۸۰ درجه)	مکعب مستطیلی به ابعاد ۴×۴×۱۶ سانتی متری	ISIRI ۴۹۰	ملات	
۶،۳،۱ (ماه)	محیط آزمایشگاهی (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) محیط تشدید یافته (مخزن با رطوبت بالای ۹۵ درصد و دمای ۶۰ درجه)	مکعب مستطیلی به ابعاد ۷/۵×۷/۵×۳۰ سانتی متری	ISIRI ۴۹۰	بتن	مقاومت خمشی

سن آزمایش	عمل آوری	آزمونه مورد استفاده	استاندارد	نوع نمونه	آزمایش
	(درجه)				
۶،۳،۱ (ماه)	محیط آزمایشگاهی (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) محیط تشدید یافته (مخزن با رطوبت بالای ۹۵ درصد و دمای ۶۰ درجه)	استوانه‌ای به ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی‌متری	ISIRI ۶۰۴۷	بتن	مقاومت کششی
	(درجه)				
هر دو هفته یک- بار	محیط آزمایشگاهی (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) محیط تشدید یافته (مخزن با رطوبت بالای ۹۵ درصد و دمای ۶۰ درجه)	مکعب مستطیلی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری		بتن	مقاومت الکتریکی

۳-۶. آزمایش انجام شده روی ملات‌های سخت شده

۳-۶-۱. آزمایش استاندارد ASTM C1260

پس از آماده‌سازی نمونه‌های اندازه‌گیری تغییرات طول، نمونه‌ها پس از یک روز از قالب خارج شده (شکل ۳-۱) و در مخزنی با دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد. سپس، ۲۴ ساعت از قرارگیری ملات‌ها در مخزن طول آن‌ها به عنوان طول اولیه با استفاده از دستگاه قرائت کرنش‌سنج (شکل ۳-۲) قرائت می‌شود.



شکل ۳-۱ قالب آماده برای آزمایش ASTM C1260



شکل ۳-۲ دستگاه قرائت کرنش سنج (تغییرات طول) و میله مرجع مطلق با استاندارد *ASTM C490*

سپس جهت تسریع در وقوع واکنش قلیایی سیلیسی طبق دستورالعمل استاندارد مذکور، نمونه‌ها تا ۱۴ روز در مخزنی حاوی محلول یک نرمال سدیم هیدروکسید (همان محلول سود با غلظت یک مولار) و در دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفته می‌شود و تنها برای قرائت تغییر طول، از اون خارج شده‌اند و بعد از قرائت، مجدداً به اون بازگردانده شده‌اند. لازم به ذکر است این عملیات در اسرع وقت (طبق جدول ۳-۷) انجام شده است. مقدار انبساط را طبق رابطه ۳-۱ محاسبه می‌گردد.

$$[۳-۱] \quad * 100 = \frac{[\text{طول اولیه (mm)} - \text{طول ثانویه}]}{250} = \text{درصد انبساط منشور}$$

۳-۶-۲. تعیین مقاومت خمشی ملات سخت شده

هدف از انجام این آزمایش، تعیین مقاومت خمشی آزمون‌های ملات قالب‌گیری شده است. مقاومت فشاری ملات از طریق بارگذاری سه نقطه‌ای منشور ملات (قالب‌گیری شده) سخت شده تا شکست آنها تعیین می‌شود. نمونه‌ها را مطابق با محیط گفته شده در جدول ۳-۸ نگهداری و عمل‌آوری می‌شود و در سنین مقرر بلافاصله پس از خارج کردن آنها از محیط نگهداری، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. آزمون‌ها تحت بار یکنواخت با آهنگ ۱۰ تا ۱۵ نیوتن بر ثانیه (بدون ضربه ناگهانی) قرار می‌گیرند به گونه‌ای که در مدت ۳۰ تا ۹۰ ثانیه شکست رخ دهد. حداکثر با اعمال شده را برحسب نیوتن ثبت می‌کنیم. آزمون‌های شکسته شده را برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری نگهداری می‌کنیم.

مقاومت خمشی، f ، را برحسب نیوتن بر میلی‌متر مربع از رابطه ۳-۲ محاسبه می‌شود:

$$f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad [۳-۲]$$

که در آن

F : حداکثر بار اعمال شده به آزمون به حساب نتوتن

L : فاصله بین محور غلتکها بر حسب میلی متر

b : عرض آزمون به حسب میلی متر

d : ارتفاع آزمون به حسب میلی متر

مقاومت خمشی هر آزمون را با تقریب 0.5 نیوتن بر میلی متر ثبت شده است. میانگین نتایج را با تقریب 0.1 نیوتن بر میلی متر مربع محاسبه کنید.

۳-۶-۳. تعیین مقاومت فشاری ملات سخت شده

آزمونه‌ها بلافاصله پس از آزمون مقاومت خمشی، تحت دستگاه اندازه‌گیری با قابلیت اعمال بار با آهنگ مشخص، مورد آزمایش قرار گرفتند. رکاب بالایی دستگاه باید بتواند به صورت آزاد حرکت کند و روی سطح آزمون قرار گیرد. و هنگام بارگذاری، رکابها نباید نسبت هم کج شوند. آزمونها را تحت بار یکنواخت با آهنگ 50 تا 500 نیوتن بر ثانیه (بدون ضربه ناگهانی) قرار می‌گیرند به گونه‌ای که در مدت 30 تا 90 ثانیه شکست رخ دهد. حداکثر بار اعمال شده را بر حسب نیوتن ثبت می‌کنیم. مقاومت فشاری آزمون را از تقسیم بار اعمال شده بر مساحت آن محاسبه می‌گردد.

۳-۷. آزمایش انجام شده روی بتن سخت شده

۳-۷-۱. آزمایش تسریع یافته $ASTM C1293$

آزمایش $ASTM C1293$ در حال حاضر معتبرترین آزمایش موجود برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها است. در این پژوهش به دلیل استفاده از مواد افزودنی و نیز محدودیت‌های زمانی، از روش آزمایش استاندارد $ASTM C1293$ تسریع یافته‌ی استفاده شده است. در این روش به جای دمای 38 درجه سلسیوس از دمای 60 استفاده شده است. با این کار، مدت زمان آزمایش برای نمونه‌های فاقد و حاوی مواد مکمل سیمانی به ترتیب از یک سال به سه ماه و از دو سال به شش ماه کاهش پیدا کرده است. تمامی نمونه‌های بتنی مورد بررسی در این پژوهش در محیط آزمایش استاندارد $ASTM C1293$ تسریع شده قرار گرفته‌اند. سپس از اتمام مرحله قالب‌گیری، همانند روش انجام آزمایش استاندارد $ASTM C1260$ برای ملات‌ها، نمونه‌های بتنی ساخته شده پس از یک روز از قالب خارج شده و در مخزنی با دمای 60 درجه سلسیوس و رطوبت بیش از 95 درصد طول این نمونه‌ها هر دو هفته یک بار قرائت می‌شود. برای بررسی جامع‌تر و مقایسه نتایج، نمونه‌های بتنی فاقد قلیایی اضافه، علاوه بر قرارگیری در مخزن آزمایش، در محلول آب و آهک اشباع به مدت شش ماه نیز قرار گرفته‌اند. انتظار می‌رود در این محیط تا پایان زمان آزمایش (شش‌ماه) واکنش قلیایی در نمونه‌های مذکور رخ ندهد. و صرفاً جهت مقایسه و تأیید رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی استفاده شده است.

۳-۷-۲. تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده

آزمایش مقاومت فشاری متداولترین آزمایش برای ارزیابی نمونه‌های بتنی است. مقاومت فشاری بتن یکی از یکی از مهم‌ترین خواص بتن در نظر گرفته می‌شود، در صورتی که در عمل در بسیاری از شرایط، مشخصات دیگری از بتن نظیر دوام و نفوذپذیری بتن نیز از اهمیت بسزایی برخوردارند. به هر حال مقاومت فشاری نمونه بتنی می‌تواند شمای کلی از کیفیت بتن را به دست دهد و نماینگر روند فعالیت‌های هیدراتاسیون، کیفیت ماتریس سیمانی بتن و پیوستگی آن‌ها با سنگ‌دانه‌ها باشد. برای تعیین مقاومت فشاری بتن، از دستگاه جک فشاری (جک بتن شکن) استفاده شده است. از آنجا که مقاومت بستگی به سرعت بارگذاری دارد، آزمون‌ها با یک سرعت کنترل شده بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۵ مگاپاسکال بر ثانیه برای جک‌های هیدرولیکی بارگذاری می‌شود و این بارگذاری تا نقطه شکست ادامه می‌دهیم، که به عنوان حداکثر باری است که آزمون تحمل می‌کند. آنگاه حداکثر بار را ثبت می‌کنیم. و از تقسیم حداکثر بار اعمال شده بر مساحت آزمون مقداری مقاومت فشاری به دست می‌آید.

۳-۷-۳. تعیین مقاومت کششی بتن سخت شده

مقاومت کششی بتن از دیگر خصوصیات مکانیکی بتن می‌باشد. به‌طور معمول مقاومت کششی حدوداً ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری بتن آن است. گسیختگی در کشش در تعداد محدودی ترک رخ می‌دهد، در حالی که گسیختگی در حالت فشار، تعداد زیاد ترک‌ها عامل این شکست است. متداولترین روش برای انجام آزمایش کشش بتن، روش غیرمستقیم (دو نیم کردن)، یا برزلی است، که بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷ صورت می‌گیرد. تعیین مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن برای آزمون‌های استوانه‌ای قالب‌گیری شده یا مغزه‌گیری شده است. آزمون بین رکاب‌های بالا و پایین دستگاه قرار داده می‌شود و بار به‌طور مداوم، یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی، با سرعت ثابتی در حدود ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلوپاستگال بر دقیقه تا هنگام گسیختگی نمونه اعمال شده است. با استفاده از رابطه ۳-۳ مقاومت کششی به روش دو نیم شدن آزمون محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{2P}{L.d} \quad [3-3]$$

که در آن

T : مقاومت کششی دو نیم شدن بر حسب کیلوپاستگال

P : بار اعمال شده بر حسب کیلونیوتن

L : طول آزمون بر حسب میلی‌متر

d : قطر آزمون بر حسب میلی‌متر

۳-۷-۴. تعیین مقاومت خمشی بتن سخت شده

در آزمایش مقاومت خمشی بتن، در واقع به‌صورت غیرمستقیم همان مقاومت کششی بتن اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمایش، مقاومت بتن در برابر نیروهای عمودی وارد بر آن سنجیده می‌شود. به‌طور ساده‌تر می‌توان گفت مقاومت بتن در برابر خم شدن اندازه‌گیری می‌شود. از مقاومت

خمشی بتن به عنوان مدول گسیختگی نیز یاد می‌شود. آزمایش مقاومت خمشی بتن معمولاً با استفاده از روش بار سه نقطه‌ای (*ASTM C78*) یا روش بار مرکزی (*ASTM C293*) انجام می‌شود. در این تحقیق از روش بار مرکزی (*ASTM C293*) برای تعیین مقاومت خمشی بتن استفاده شده است. نحوه بارگذاری به این صورت است که بار باید با سرعت یکنواخت (بدون ضربه) به تیر وارد گردد. در پایان آزمایش چنانچه ترک در فاصله بین دو نقطه بارگذاری به وجود آید مقاومت خمشی آزمون از رابطه ۳-۴ بدست می‌آید:

$$R = \frac{F \cdot L}{bd^2} \quad [4-3]$$

که در آن

R: مقاومت خمشی آزمون بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

F: حداکثر بار اعمال شده به آزمون بر حسب کیلوگرم

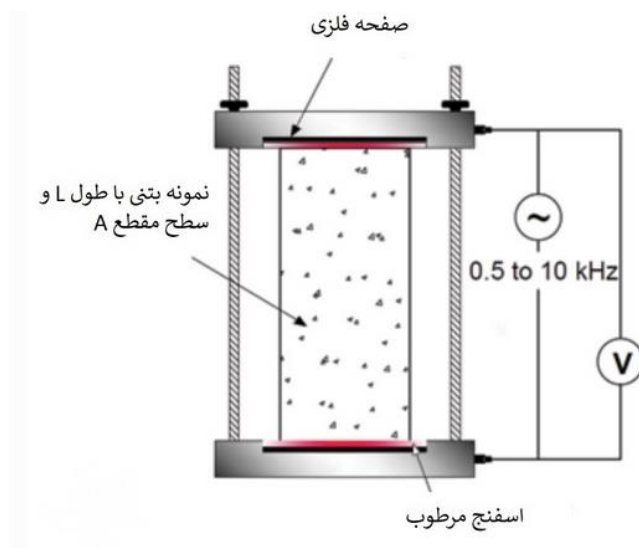
L: فاصله بین محور غلتک‌ها بر حسب سانتی‌متر

b: عرض آزمون بر حسب سانتی‌متر

d: ارتفاع آزمون بر حسب سانتی‌متر

۳-۷-۵. مقاومت الکتریکی

دوام بتن وابستگی زیادی به ریز ساختار آن مانند میزان منافذ، توزیع و شکل ارتباطات بین آنها دارد. هرچه شبکه فضای خالی بتن ریزتر و با ارتباطات کمتر باشد نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد و برعکس یک ساختار متخلخل با میزان بالای ارتباطات داخلی بین ذرات باعث نفوذپذیری زیاد و کاهش دوام می‌شود. ایده اصلی که در روش مقاومت الکتریکی بتن استفاده می‌شود این است که به نحوی مشخصات ریزساختار بتن مورد ارزیابی واقع شود. به همین دلیل این آزمایش بین پژوهشگران بسیار معروف و رایج است. این آزمایش با استفاده از دو صفحه مسی یا برنجی، که بر سطح آزمون بتنی اشباع از آب به کمک خمیر سیمان تازه چسبیده و مقاومت الکتریکی به کمک اعمال یک جریان متناوب با فرکانس مشخص بدست می‌آید (شکل ۳-۳). می‌توان با داشتن سطح بتن و فاصله بین دو صفحه فلزی، مقاومت ویژه الکتریکی را بدست آورد. هم‌چنین می‌توان با چهار الکتروود (روش ونر) و تعبیه آن بر سطح بتن یا در سوراخ خاص و برقراری اتصال و تماس الکتریکی، مقاومت الکتریکی و مقاومت ویژه آن را بدست آورد. این روش برای قطعات بتنی موجود نیز قابل استفاده است، در حالی که روش قبلی فقط برای آزمون‌های آزمایشگاهی مکعبی، استوانه‌ای یا منشوری و مکعب مستطیل کاربرد دارد. در این تحقیق نیز از نمونه‌های مکعبی 100 mm برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن استفاده شده است. تعداد دفعات قرائت مقاومت الکتریکی برابر و همزمان با قرائت انبساط آزمایش تسریع یافته *ASTM C1293* می‌باشد حدوداً هر دو هفته یک بار این قرائت انجام شده است.



شکل ۳-۳ شمایی دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

۳-۸. جمع‌بندی

از آنجایی که اثرات واکنش قلیایی سیلیسی در دراز مدت در سازه پدیدار می‌شود با مساعد کردن شرایط برای وقوع واکنش قلیایی سیلیسی به ارزیابی مضر بوده و سرعت واکنش‌پذیری سنگدانه‌های تهیه شده و همچنین ارزیابی مشخصه‌های مکانیکی و دوامی به بررسی میزان اثرگذاری واکنش مخرب قلیایی سیلیسی بر ساختار مخلوط و آن پرداخته شده است. در این فصل مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها، توضیح جزئیات ساخت و روش انجام آزمایش‌ها ارائه شده است. به‌طور کلی سعی شده است جهت مقایسه نتایج، مشخصات ساخت و آزمایش‌های صورت گرفته، مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی و مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا همسان باشند. و همچنین به‌منظور بررسی بیشتر و نیز تأیید و یا رد نتایج بوده اقدام به ساخت مخلوط‌های ملات و بتنی شده است.

فصل چهارم:

بحث و نتایج

۴-۱. مقدمه

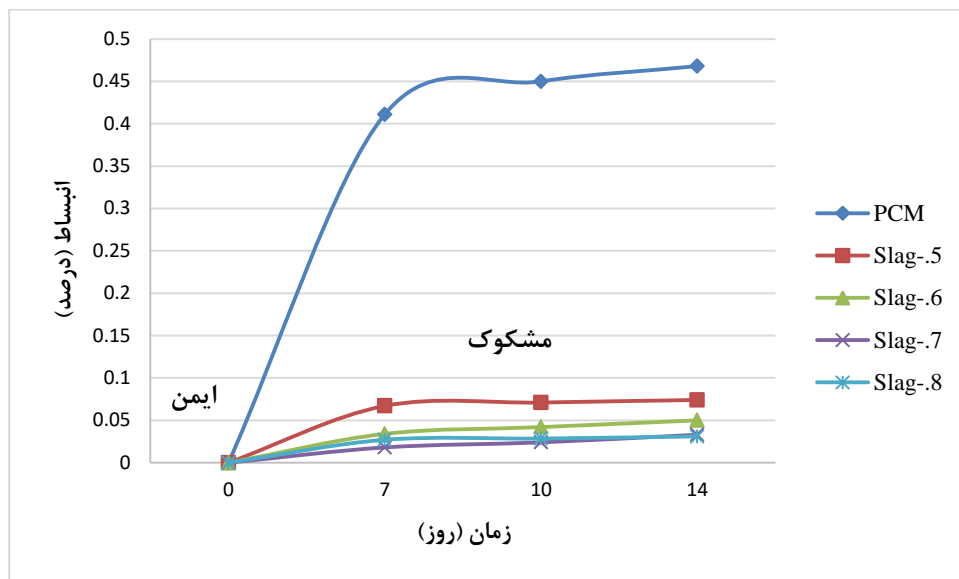
براساس برنامه ارائه شده در فصل سوم از پنج طرح ملاتی و شش طرح بتنی حاوی سنگدانه‌های واکنش‌پذیر ساخته شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌ها در سه بخش ارائه می‌گردد. بخش اول اختصاص دارد به بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌های ملات و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایش استاندارد *ASTM C1260*، بخش دوم به بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌های بتنی و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایش استاندارد *ASTM C1293* تسریع‌یافته و صحت نتایج آزمایش استاندارد *ASTM C1260* پرداخته شده است و در بخش سوم با توجه به اهداف پژوهش به بررسی تأثیرپذیری مشخصه‌های مکانیکی (مقاومت فشاری، خمشی، کششی) و مقاومت الکتریکی بتن از واکنش قلیایی سیلیسی پرداخته شده است. که بتوان از آن‌ها به‌عنوان روشی جهت ارزیابی واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها استفاده نمود.

۴-۲. مطالعه ملات‌های ساخته شده

نمونه‌های ملاتی ساخته‌شده، با هدف مستعد نمودن شرایط برای وقوع واکنش قلیایی سیلیسی در محیطی مطابق با شرایط درج شده در آزمایش استاندارد *ASTM C1260*، (یعنی محلول یک مولار سود در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد) عمل‌آوری و نگهداری شده است. لازم به ذکر است استاندارد یاد شده تنها بر مبنای اندازه‌گیری تغییرات طول ملات (اندازه‌گیری انبساط)، در مدت زمان ۱۴ روز بوده است. اما به جهت اطمینان از اعتبار و صحت نتایج، آزمایش مشخصه‌های مکانیکی (مقاومت فشاری و خمشی) تا سن ۲۸ روز تحت همان شرایط عمل‌آوری و نگهداری ادامه داده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد برای فعال‌سازی سرباره توسط مواد قلیایی از چهار سطح نسبت محلول فعال‌ساز به سرباره (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸) استفاده شده است. و در ادامه به بررسی نتایج آزمایش انبساط و مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ملاتی می‌پردازیم.

۴-۲-۱. نتایج آزمایش *ASTM C1260*

در این آزمایش بر مبنای اندازه‌گیری تغییرات طول ملات (اندازه‌گیری انبساط)، واکنش‌پذیری سنگدانه‌ی مورد استفاده و همچنین تأثیر مقدار محتوای قلیائیت به عنوان ماده فعال‌ساز سرباره کوره آهن‌گدازی (مواد پایه) تحت تأثیر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج انبساط نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۴-۱ ارائه شده است.



شکل ۴-۱ نتایج انقباض مطابق با استاندارد *ASTM C1260* در ملات‌های حاوی سنگ‌دانه تهیه شده از یکی از معادن آذربایجان

همان‌طور که در شکل ۴-۱ نیز مشخص است انقباض نمونه‌ی کنترل (*PCM*)، بیانگر واکنش‌پذیری بودن سنگ‌دانه‌های استفاده شده در نمونه‌ها است. زیرا نمونه‌های کنترل (*PCM*)، انقباض بسیار زیادی را تولید کرده، به گونه‌ای که بعد از ۱۴ روز به حدود ۰/۴۷ درصد رسیده است. این‌رو می‌توان مطابق با استاندارد *ASTM C1260*، این سنگ‌دانه را بسیار واکنش‌پذیر قلمداد نمود. مطابق با استاندارد ذکر شده، در صورتی که میزان انقباض کم‌تر از ۰/۱ درصد باشد، سنگ‌دانه استفاده شده را می‌توان واکنش‌ناپذیر یا سالم، در صورتی که میزان انقباض بیش‌تر از ۰/۲ درصد باشد، سنگ‌دانه استفاده شده را می‌توان واکنش‌پذیر و در صورتی که میزان انقباض بین ۰/۱ تا ۰/۲ درصد باشد، نمی‌توان به‌طور دقیق در مورد واکنش‌پذیری سنگ‌دانه اظهار نظر نمود و لازم است آزمایش‌های درازمدت انجام شود. در این مواقع لزوم انجام آزمایش‌های درازمدت نظیر *ASTM C1293* به شدت احساس می‌شود، تا بتوان اظهار نظر قطعی نمود. در نتیجه طبق آزمایش استاندارد سنگ‌دانه مورد استفاده در این پژوهش واکنش‌پذیر بوده است.

دقت در نتایج سایر نمونه‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد با جایگزینی کامل سیمان پرتلند معمولی با سرباره فعال شده با قلیا به شدت از وقوع انقباض ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی کاسته شده و براساس ارزیابی آزمایش استاندارد *ASTM C1260* مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا به خوبی توانسته است این واکنش را مهار نماید، که این موضوع را می‌توان به تولید سریع محصولات ژئوپلیمراسیون^۱ ناشی از فعال‌سازی با قلیا نسبت داد (تالینگ و براندستتر، ۱۹۸۹: ۱۵۴۶-۱۵۱۹). برخی محققین انقباض کمتر ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نسبت به ملات مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی را عمدتاً به قلیابیت پایین منافذ در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، نسبت داده‌اند. در واقع، غلظت پایین یون هیدروکسید $[OH]$ در

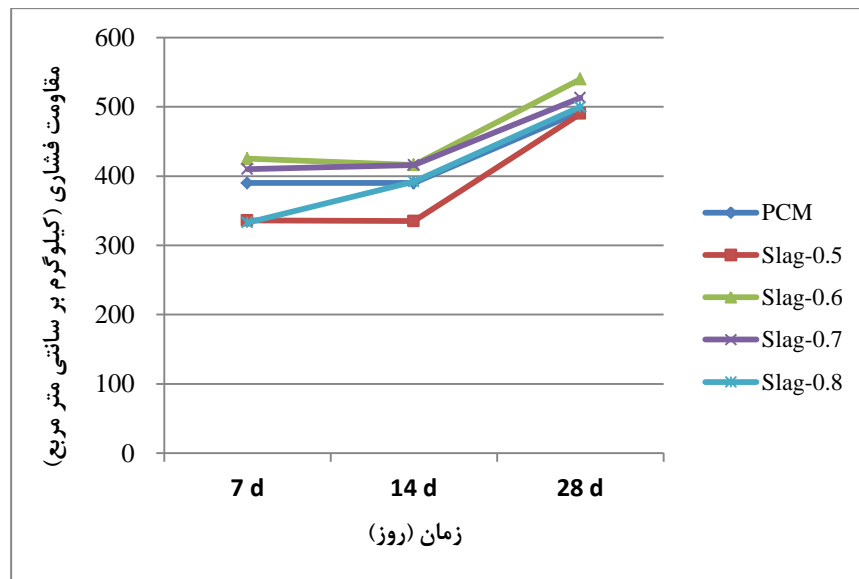
1. Geopolymerization

این گونه ملات‌ها، بیشتر به دلیل عدم وجود پورتلندایت و اتصال قلیاها توسط محصولات هیدراسیون بوده است (مورنون و همکاران، ۲۰۱۷: ۷۴-۵۸). با دقت در نتایج مشخص می‌شود انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی با افزایش مقدار محتوای قلیائیت (نسبت محلول فعال‌ساز به سرباره)، کاهش یافته است. البته اختلاف ناچیزی بین انبساط مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا وجود دارد. همچنین انبساط ناشی از این واکنش در تمامی ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا کمتر از محدوده بی‌خطر (حد ۰/۱) بوده است، به عبارتی انبساط نمونه‌های فعال شده با قلیا کمتر از حد پایینی محدوده مشکوک است. با دقت در نتایج، می‌توان استفاده از سرباره فعال شده با قلیا را برای ملات‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر، موثر تلقی نمود. نتایج حاصل در این بخش از پژوهش، با نتایج بدست آمده توسط برخی محققین (چاپکس و اسکرینور، ۲۰۱۲: ۱۶۴۹-۱۶۴۵؛ پوئرتاس و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۸۴-۲۷۷) همسو بوده است.

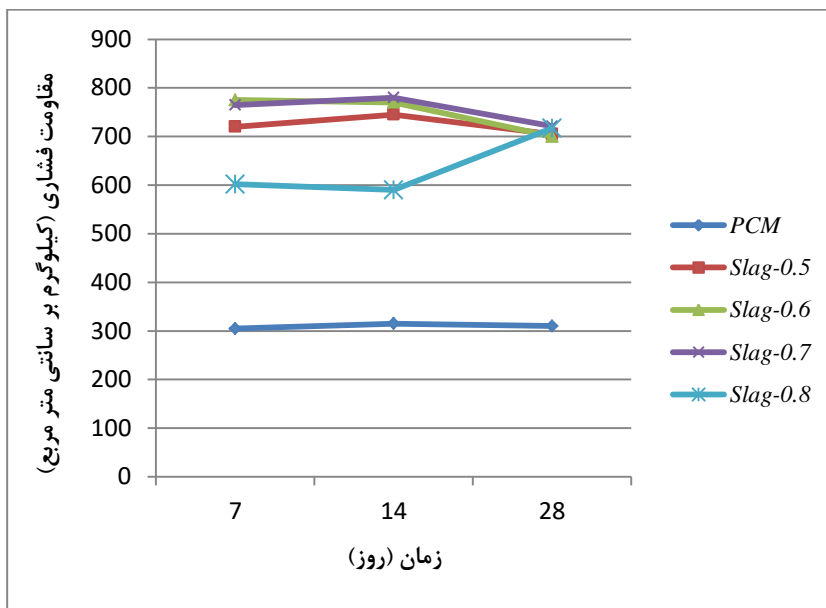
۴-۲-۲. نتایج مقاومت فشاری ملات

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ملات‌های نگهداری شده در محیط آزمایشگاهی یا همان محیط کنترل (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) و محیط تشدید یافته (طبق الزامات مندرج در استاندارد *ASTM C1260*، یعنی محلول سود یک مولار و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد) به ترتیب در شکل‌های ۲-۴ و ۳-۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۴-۲، با گذر زمان، مقاومت فشاری ملات‌های نگهداری شده در محیط کنترل، روند افزایشی داشته است. همچنین به صورت تقریبی مقادیر مقاومت همه ملات‌ها در یک بازه بوده و اختلاف مقاومت فشاری چشم‌گیری بین طرح‌ها مشاهده نشده است. به عبارتی نتایج ملات کنترل و نمونه‌های ملاتی مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، نزدیک به هم بوده است. لازم به ذکر است، وقوع واکنش قلیایی سیلیسی، به شدت تابع زمان است و لازم است زمانی طولانی جهت وقوع آن طی شود، مگر اینکه نمونه‌ها در محیط تشدید یافته وقوع واکنش قرار گیرند. لذا، در این مدت زمان اندک (۲۸ روز) نمونه‌های عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاهی (محیط کنترل)، تحت تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی قرار نگرفته است؛ به همین دلیل مقاومت فشاری، روندی صعودی پیش گرفته است. نتایج ملات‌های نگهداری شده تحت محیط تشدید یافته (طبق الزامات مندرج در آزمایش استاندارد *ASTM C1260*)، وقوع واکنش قلیایی سیلیسی را تایید می‌کند. علت این موضوع را می‌توان در کاهش مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در محیط تشدید یافته در گذر زمان جستجو نمود. این موضوع را می‌توانید با ملاحظه نتایج مندرج در شکل ۳-۴، جستجو نمایید. همچنین، نتایج مقاومت فشاری همسو با نتایج آزمایش استاندارد *ASTM C1260* می‌باشد. به عنوان مثال، نمونه *PCM* که براساس نتایج آزمایش استاندارد *ASTM C1260* با بیشترین مقدار انبساط (حدود ۰/۴۷ درصد) مواجه بوده است، کمترین مقاومت فشاری را نیز داشته است. در ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا پس از گذشت ۲۸ روز، کاهش مقاومت فشاری در تمامی طرح‌ها (بجز طرح ۵ با نسبت محلول فعال‌ساز به سرباره در آن ۰/۸) مشاهده شده است. که نشان‌دهنده وقوع واکنش قلیایی سیلیسی و تأثیر واکنش بر مقاومت فشاری مخلوط‌های مبتنی بر

سرباره فعال شده با قلیا است. اما در طرح ۵ با بیشترین مقدار قلیائیت (با نسبت محلول فعال ساز به سرباره در آن ۰/۸) مقاومت فشاری روند افزایشی داشته است. می توان دلیل آن را فعال سازی سرباره توسط قلیا و تشکیل محصولات ژئوپلیمراسیون نسبت داد. همان طور که در شکل ۳-۴ نیز مشخص است، مقادیر مقاومت فشاری نمونه های کنترل *PCM* بسیار کمتر از نمونه های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا است. این اختلاف در میزان مقاومت فشاری، نشان دهنده عملکرد مناسب نمونه های سرباره ای فعال شده با قلیا نسبت به نمونه کنترل *PCM* است. همچنین نتایج مقاومت فشاری مخلوط های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا و حاوی سنگ دانه های واکنش پذیر نشان دهنده اثر مثبت این نوع مخلوط ها در کنترل میزان واکنش قلیایی سیلیسی سنگ دانه ها است. به عبارت دیگر، جایگزینی سیمان با سرباره فعال شده با قلیا، منجر به افزایش مقاومت فشاری در طرح های مورد بررسی شده است. به طور مثال، مقاومت فشاری نمونه های *Slag-0.5* و *Slag-0.8* در مقایسه با نمونه کنترل *PCM* و در همه سنین، بیش از دو برابر نسبت به نمونه کنترل *PCM* افزایش داشته است. ضمناً با دقت در نتایج مشخص می شود محیط نگهداری نمونه های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا با صرف نظر از واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه، تاثیر بسزایی در مقاومت فشاری دارد. زیرا بازده مقادیر مقاومت فشاری نمونه های نگهداری شده در محیط تشدید یافته بیشتر از مقادیر مقاومت فشاری نمونه های نگهداری شده در محیط آزمایشگاهی است. دلیل آن را می توان به بالا بودن دمای محیط تشدید یافته و تاثیر آن در فعال سازی بیشتر سرباره نسبت داد.



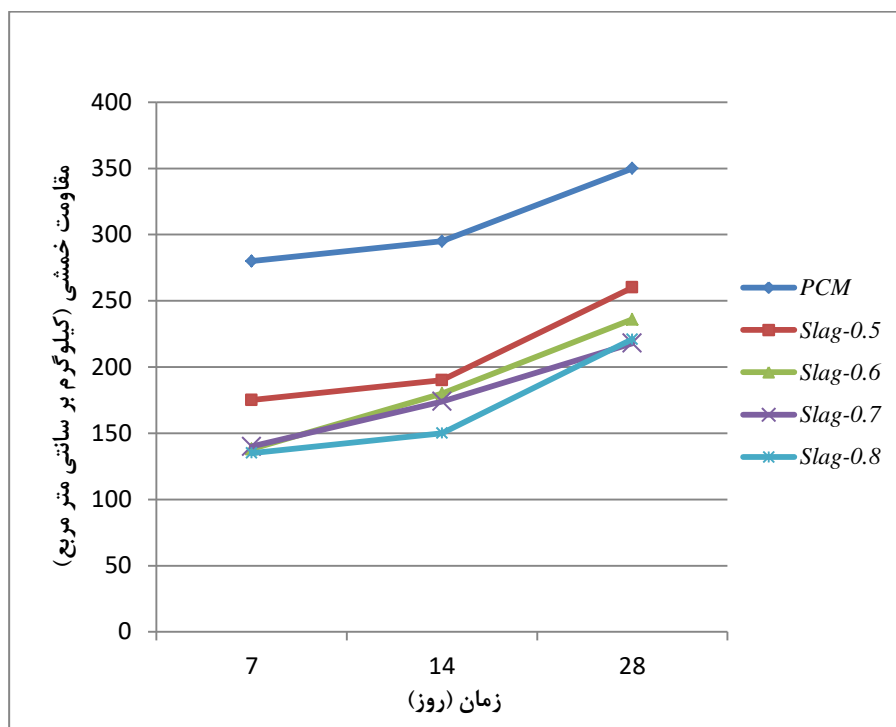
شکل ۳-۴ نتایج مقاومت فشاری ملات های عمل آوری شده در محیط آزمایشگاهی (کنترل)



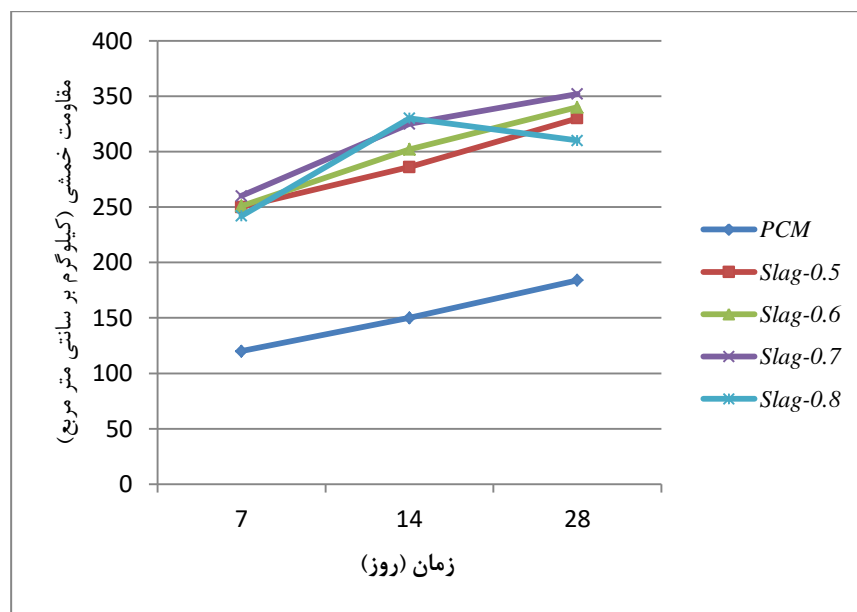
شکل ۳-۴ نتایج مقاومت فشاری ملات‌های عمل‌آوری‌شده در محیط تشدید یافته

۴-۲-۳. نتایج مقاومت خمشی ملات

نتایج آزمایش مقاومت خمشی ملات‌های نگهداری شده در دو محیط متفاوت، یعنی محیط آزمایشگاهی یا همان محیط کنترل (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) و محیط تشدید شده (طبق الزامات مندرج در آزمایش استاندارد *ASTM C1260* یعنی محلول سود یک مولار و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد) به ترتیب در شکل‌های ۴-۴ و ۴-۵ ارائه شده است. مقاومت خمشی ملات‌های نگهداری شده در محیط کنترل، با گذشت زمان به دلیل تشکیل محصولات هیدراسیون یا ژئوپلیمراسیون همانند مقاومت فشاری روند افزایشی داشته است. حتی نمونه *PCM* در مقایسه با ملات‌های مبتنی بر سرباره‌ای فعال شده با قلیا، مقاومت خمشی بیشتری از خود نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد در ملات‌های مبتنی بر سرباره‌ای فعال شده با قلیا، با افزایش محتوای قلیائیت (نسبت محلول فعال‌ساز به سرباره)، در تمامی سنین مقاومت خمشی کاهش یافته است. در نتیجه عملکرد نمونه *PCM*، نسبت به نمونه‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا در محیط آزمایشگاهی مناسب‌تر بوده است. اما برخلاف نمونه‌های نگهداری شده در محیط آزمایشگاهی، از نتایج ملات‌های نگهداری شده در محیط تشدید یافته، مشخص شد ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نسبت به نمونه کنترل *PCM* مقاومت بیشتری داشته است و همچنین با افزایش محتوای قلیائیت، مقاومت خمشی نمونه‌ها روند افزایشی داشته است، که می‌توان دلیل آن را به تاثیر مثبت دما به عنوان مکمل فعال‌ساز قلیایی در تسریع فعال‌سازی سرباره و تشکیل محصولات هیدراسیون یا ژئوپلیمراسیون نسبت داد. البته در طرح *Slag-0.8* (دارای بالاترین مقدار قلیائیت جهت فعال‌سازی سرباره) در سنین اولیه شاهد رشد مقاومت خمشی بوده‌ایم، ولی در ادامه با افزایش سن نمونه مقاومت خمشی روند کاهشی داشته است. احتمالاً با افزایش زیاد قلیائیت برای فعال‌سازی سرباره (در محیط تشدید یافته)، واکنش قلیایی سیلیسی رخ داده است.



شکل ۴-۴ نتایج مقاومت خمشی ملات‌های عمل‌آوری‌شده در محیط آزمایشگاهی (کنترل)



شکل ۴-۵ نتایج مقاومت خمشی ملات‌های عمل‌آوری‌شده در محیط تشدید یافته

به‌طور کلی مقاومت خمشی نمونه *PCM* نگهداری‌شده در هر دو محیط آزمایش روند افزایشی داشته است. هرچند مقادیر مقاومت خمشی در نمونه *PCM* نگهداری‌شده در محیط کنترل، نسبت به نمونه کنترل *PCM* نگهداری‌شده در شرایط تشدید یافته بیشتر بوده است. دلیل این موضوع را می‌توان به بالابودن دمای محیط و تأثیر دما بالا در وقوع واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه نسبت داد. این نتایج را نیز می‌توان با نتایج انبساط بدست آمده از آزمایش انبساط استاندارد *ASTM C1260*

تسریع یافته مقایسه کرد. همان‌گونه که در قسمت قبلی اشاره شد، نمونه *PCM* تحت شرایط تشدید یافته بیشترین انبساط را داشته است. در این بخش نیز مشاهده شد، این نمونه تحت آزمایش مقاومت خمشی کمترین مقدار مقاومت خمشی را داشته است. علاوه بر این در این بخش، طرح *Slag-0.7* (با نسبت محلول فعال‌ساز به سرباره : ۰/۷) با کمترین مقدار انبساط، دارای بیشترین میزان مقاومت خمشی بوده است. همین نتیجه هم‌گرایی قابل ملاحظه نتایج در این دو آزمایش با یکدیگر را نشان می‌دهد. به بیان دیگر، در طول مدت زمان آزمایش، انبساط ملات‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا کمتر از مقدار مجاز آزمایش استاندارد *ASTM C1260* بوده است و این نوع ملات‌ها نیز تحت آزمایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه *PCM*، بیشترین مقاومت را داشته است. پس می‌توان پی برد در یک محیط یکسان (محیط مستعد وقوع واکنش قلیایی سیلیسی) بین نتایج انبساط نمونه‌ها و نتایج مقاومت خمشی همبستگی معناداری وجود دارد. اگرچه همانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی نمونه *PCM* نگهداری شده در شرایط تشدید یافته نسبت به نمونه نگهداری شده در شرایط آزمایشگاهی کمتر است. اما تفاوت مقادیر آن‌ها در مقاومت خمشی بسیار چشم‌گیرتر است. به بیان دیگر، مقادیر تقریبی اختلاف مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز بین این دو محیط برای نمونه *PCM*، به ترتیب ۲۲، ۱۹ و ۳۷ درصد بوده است؛ اما این مقادیر برای مقاومت خمشی، به ترتیب به ۵۷، ۴۹ و ۴۷ درصد رسیده است. این نتایج تأییدی بر اثرپذیری بیشتر مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری از واکنش قلیایی سیلیسی است. علاوه بر این کاهش مقاومت خمشی ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی، یک روند منظمی داشته و با گذشت زمان از شدت آن کاسته شده است.

لازم به ذکر است که مقاومت خمشی کلیه نمونه‌ها بجز طرح *Slag-0.8* (با نسبت محلول فعال‌ساز به سرباره: ۰/۸) تحت شرایط تشدید یافته با گذشت زمان کاهش پیدا نکرده و تدریجاً افزایش یافته است. این افزایش نسبی مقاومت خمشی می‌تواند به دلیل غالب شدن اثر هیدراسیون یا ژئوپلیمراسیون بر اثر واکنش قلیایی سیلیسی و یا رقیق‌سازی (شستشو) قلیایی باشد که منجر به بازیابی مقاومت ملات شده است.

۴-۳. مطالعه نمونه‌های بتنی

در پژوهش حاضر، نمونه‌های بتنی ساخته شده تحت آزمایش تسریع شده *ASTM C1293* جهت اندازه‌گیری انبساط و نیز مشخصه‌های مکانیکی نظیر مقاومت فشاری، خمشی، کششی و همچنین مقاومت الکتریکی قرار گرفته شده است. از دو نوع نمونه بتنی ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی (*PC-NA-W*: مغروق در محیط کنترل و فاقد قلیا و *PC-A-S*: قرار گرفته در محیط تسریع شده و دارای قلیا) جهت مقایسه با نتایج نمونه‌های بتنی ساخته شده از سرباره فعال شده با قلیا، به منظور اطمینان از رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی و واکنش‌پذیر بودن سنگ‌دانه استفاده شده است. نمونه کنترل *PC-NA-W*، در طول آزمایش در محیط آزمایشگاه (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) نگهداری شد و به این نمونه، مواد قلیایی جهت دستیابی به سطح ۱/۲۵ درصد قلیایی سیمان، افزوده نگردید و تنها قلیایی در این نمونه همان میزان قلیایی طبیعی موجود در

سیمان مصرفی است. اما نمونه کنترل *PC-A-S*، در طول آزمایش در محیط تشدید یافته (دارای شرایط مستعد جهت وقوع واکنش قلیایی سیلیسی) نگهداری شده است و به این نمونه، مواد قلیایی برای دستیابی به سطح ۱/۲۵ درصد قلیایی سیمان، افزوده شده است و قلیایی موجود در این نمونه بیش تر از میزان قلیایی طبیعی سیمان مصرفی است. در واقع هدف از این کار مساعد کردن شرایط برای وقوع واکنش قلیایی سیلیسی بوده است.

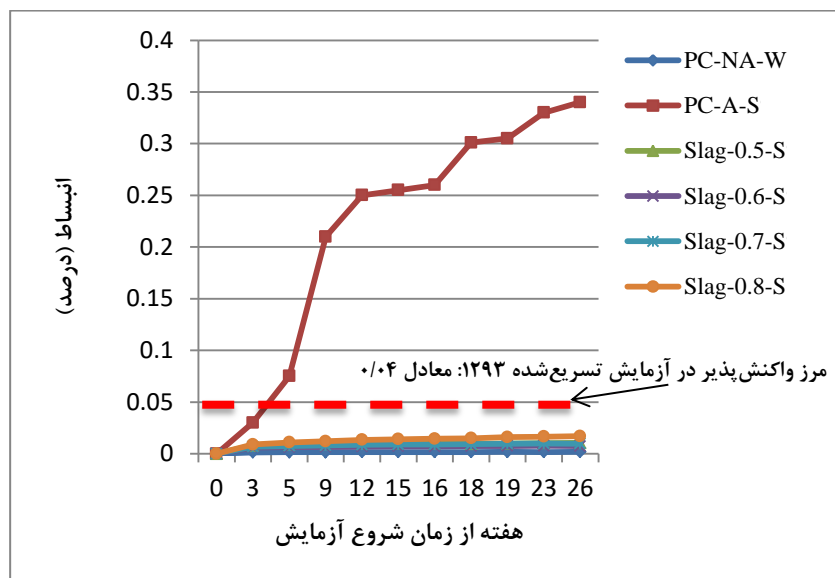
سایر نمونه‌های بتنی ساخته شده از سرباره فعال شده با قلیا، از چهار سطح نسبت محلول فعال ساز به سرباره (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸)، همراه با سنگدانه واکنش پذیر ساخته شده است. همچنین، جهت بررسی بیش تر نمونه‌های بتنی ساخته شده از سرباره فعال شده با قلیا، کلیه نمونه‌ها در دو محیط، قرار گرفتند. محیط‌های یاد شده شامل محیط آزمایشگاهی (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) و محیط تشدید یافته (طبق شرایط مندرج در آزمایش *ASTM C1293* تسریع یافته با دمای ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت ۱۰۰ درصد)، بود. لازم به ذکر است سنگدانه‌های مصرفی در تمامی مخلوط‌ها، واکنش پذیر و از یک معدن در استان آذربایجان شرقی تهیه شده است. واکنش پذیر بودن این سنگدانه بر اساس نتایج آزمایش *ASTM C1260*، اثبات شد. علاوه بر این، نتایجی که در ادامه ارائه خواهد شد، مهر تأییدی است بر واکنش پذیر بودن این سنگدانه‌ها. در ادامه به بررسی نتایج آزمایش انبساط و مشخصه‌های مکانیکی در نمونه‌های بتنی سرباره فعال شده با قلیا و مقایسه با نتایج نمونه‌های کنترل پرداخته شده است.

۴-۳-۱. نتایج انبساط آزمایش *ASTM C1293* تسریع یافته

آزمایش *ASTM C1293* معتبرترین آزمایش موجود برای ارزیابی واکنش پذیری سنگدانه‌ها است. بسیاری از آزمایش‌های موجود، پس از بررسی واکنش پذیری سنگدانه‌ها، برای تأیید یا رد نتایج خود نیازمند انجام آزمایش *ASTM C1293* هستند. این آزمایش به دلیل صرف مدت زمان زیاد و شرایط متعادلی که برای انجام واکنش فراهم می‌آورد، نتایج معتبری ارائه می‌کند. از طرف دیگر، همان‌گونه که گفته شد دستیابی به نتایج دقیق، نیازمند صرف مدت زمان زیادی است و این آزمایش برای نمونه‌های فاقد مواد افزودنی به یک سال، و با مواد افزودنی به دو سال، زمان نیاز دارد. از این رو، صرف چنین زمانی، جز در موارد خاص و شرایط آزمایشگاهی چندان کاربردی نداشته و باعث شده است بیش تر محققین به سمت استفاده از آزمایش‌های کوتاه مدت و سریع تر متمایل شوند (محمدی و همکاران، ۲۰۲۰؛ باریوسا و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۵۱-۴۴۰).

یکی از تغییراتی که در آزمایش *ASTM C1293* انجام شده است تا بتوان زمان آن را کاهش داد، تغییر دمای نگهداری نمونه‌ها از ۳۸ به ۶۰ درجه سلسیوس است که در نمونه‌های فاقد و دارای مواد مکمل سیمانی به ترتیب باعث کاهش زمان آزمایش از یک سال به سه ماه، و از دو سال به شش ماه می‌شود. موارد دیگری نیز ارائه شده است که بتوان به کمک آن زمان آزمایش را کاهش داد، از جمله قرار دادن نمونه‌ها در محلول‌های قلیایی با غلظت‌های متفاوت، اما هر کدام باعث ارائه نتایج نادرستی شده‌اند. لذا، تنها افزایش دما از ۳۸ به ۶۰ درجه سلسیوس توانست بیش ترین انطباق را با نتایج

ASTM C1293 داشته باشد (*ASTM C289-94*، ۲۰۰۱؛ *ASTM C1260-14*، ۲۰۱۴). از این رو، در تحقیق حاضر نیز از آزمایش استاندارد *ASTM C1293* تسریع یافته که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس استفاده شده و لازم است حداقل انبساط نمونه‌های بدون افزودنی تا سه ماه و نتایج نمونه‌های حاوی مواد افزودنی تا شش ماه قرائت گردد. به عبارت دیگر، نتایج مرتبط با سن سه‌ماهه نمونه‌های شاهد با نتایج شش‌ماهه نمونه‌های حاوی افزودنی‌های معدنی مقایسه گردیده است. اگرچه، در این تحقیق سعی شده است تمامی نمونه‌ها تا شش ماه مورد مطالعه قرار بگیرد. نتایج آزمایش استاندارد *ASTM C1293* تسریع یافته بر روی مخلوط ساخته شده از سنگ‌دانه‌های آذربایجان شرقی در شکل ۴-۶ ارائه شده است. در ابتدا با قرائت و مقایسه تغییرات طول نمونه‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی یعنی هر دو نمونه کنترل *PC-NA-W* و *PC-A-S* مشخص می‌شود اولاً واکنش قلیایی سیلیسی در نمونه نگهداری شده در محیط تشدید یافته (مخزن با دمای ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت ۱۰۰ درصد) (یعنی نمونه *PC-A-S*) رخ داده است. این موضوع در حالی است که در نمونه کنترل مغروق در محیط کنترل یا همان آزمایشگاه (*PC-NA-W*)، واکنش معناداری رخ نداده است. ثانیاً براساس آزمایش *ASTM C1293* تسریع یافته، می‌توان سنگ‌دانه‌های تهیه شده از یکی از معادن آذربایجان شرقی را واکنش‌پذیر قلمداد نمود. زیرا این سنگ‌دانه بعد از گذشت سه ماه از شروع آزمایش، انبساطی برابر با ۰/۲۵ درصد و بعد از گذشت شش‌ماه نیز انبساطی برابر با ۰/۳۴ درصد از خود نشان داد؛ حال آن‌که مطابق با استاندارد *ASTM C1293* تسریع یافته، در صورت رخداد انبساط بیش از ۰/۰۴ درصد طی مدت سه ماه از آغاز آزمایش، می‌توان سنگ‌دانه را واکنش‌پذیر برشمرد. لذا بر این اساس می‌توان این سنگ‌دانه‌ها را بسیار واکنش‌پذیر در نظر گرفت. ثالثاً انبساط نمونه کنترل *PC-A-S*، با نتایج حاصل از آزمایش *ASTM C1260* همسو بوده و آن را تأیید می‌کند.



شکل ۴-۶ نتایج انبساط نمونه‌های بتنی قرارگرفته در هر دو محیط مورد آزمایش

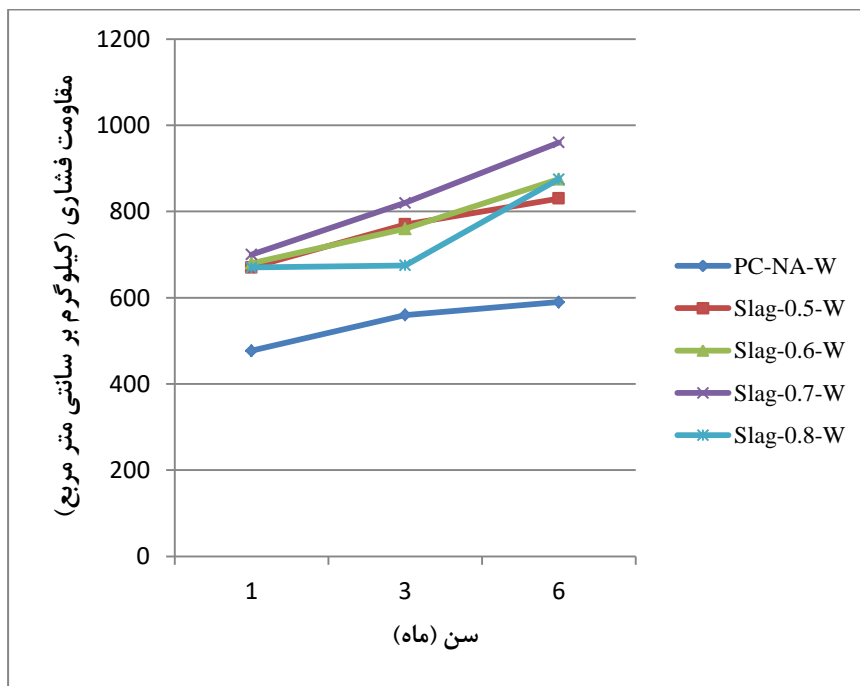
با ملاحظه نتایج مندرج در شکل ۴-۶، به وضوح اثر مثبت مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا در کاهش و سرکوب اثرات مخرب واکنش قلیایی سیلیسی (انبساط) مشهود است. به عبارتی انبساط تمامی مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا کمتر از ۰/۰۴ درصد مجاز تعیین شده در استاندارد *ASTM C1293* تسریع یافته بوده است. در واقع انبساط همه طرح‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا کمتر از ۰/۰۱ درصد بوده است؛ که این میزان از حد تعریف شده معادل ۰/۰۴ درصد، بسیار کمتر است. با دقت در نتایج بتن‌های فعال شده با قلیا نسبت به یک‌دیگر ملاحظه می‌شود، تغییر در میزان قلیائیت مخلوط (نسبت محلول فعال ساز به سرباره)، تفاوت معناداری در میزان انبساط این نمونه‌ها در شرایط مستعد انجام واکنش قلیایی سیلیسی بوجود نمی‌آورد. عملکرد فوق‌العاده مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا را می‌توان در نتایج بدست آمده پس از گذشت شش ماه از آغاز آزمایش نیز، ملاحظه نمود. به طور مثال، پس از گذشت شش ماه از آغاز آزمایش، میزان انبساط در نمونه‌های حاوی نسبت قلیایی ۰/۵ و ۰/۸، در مقایسه با نمونه کنترل (*PC-A-S*)، به ترتیب ۹۷ و ۹۵ درصد کاهش یافته است.

به‌طور کلی و با استناد به نتایج نمونه‌های کنترل (نمونه‌های مبتنی بر سیمان پرتلند) تحت آزمایش‌های مشروح در استانداردهای *ASTM C1260* و *ASTM C1293* تسریع شده، سنگ‌دانه‌های مصرفی در این پژوهش، واکنش‌پذیر محسوب می‌شوند، همچنین اثر مثبت مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا در کاهش انبساط بسیار مشهود است، که این موضوع را می‌توان به مصرف شدن قلیائیت توسط سرباره، جهت فعال‌سازی سرباره نسبت داد.

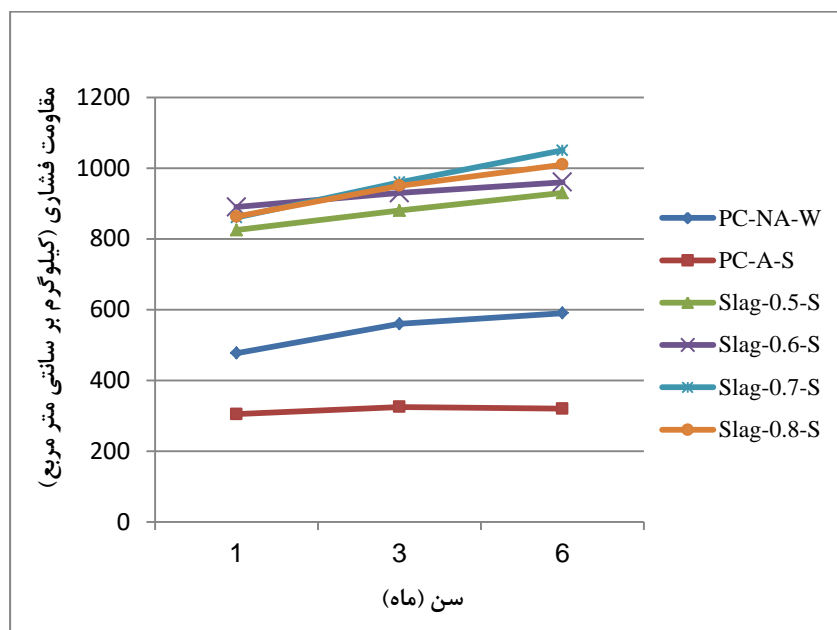
۴-۳-۲. نتایج مقاومت فشاری بتن

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاهی یا همان کنترل (آب و آهک اشباع در دمای تقریباً ۲۳ درجه سلسیوس) و محیط تشدید یافته (طبق الزامات آزمایش *ASTM C1293* تسریع شده) به ترتیب در شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ ارائه شده است. کلیه نمونه‌های بتنی در هر دو محیط عمل‌آوری شده با گذشت زمان و با تشکیل محصولات هیدراسیون و ژئوپلیمراسیون، دارای مقاومت فشاری با روند روند افزایشی بوده‌اند. همچنین، مشخص شد بین مقدار قلیائیت استفاده شده جهت فعال‌سازی سرباره با مقاومت فشاری، ارتباط مستقیم وجود دارد، البته نمونه بتنی طرح *Slag-0.8* (با نسبت محلول فعال ساز به سرباره: ۰/۸)، نسبت به سایر نمونه‌های بتنی مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، مقاومت فشاری کمتری داشته است. این موضوع مبین این واقعیت است که زمانی که قلیائیت مخلوط بتنی از یک مقدار معین بیش‌تر شود، روند افزایشی مقاومت کاهش یافته و یا حتی می‌تواند روندی نزولی در مقاومت رخ دهد. براساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری، نمونه *PC-A-S* نسبت به نمونه *PC-NA-W* در سنین یک‌ماهه، سه‌ماهه و شش‌ماهه، به ترتیب ۳۶، ۴۲ و ۴۶ درصد کاهش مقاومت فشاری داشته است. در واقع می‌توان با مقایسه نتایج مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی (نمونه‌های کنترل)، به وقوع واکنش قلیایی سیلیسی پی برد. همچنین مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته شده از سرباره فعال شده با قلیا، نسبت به نمونه کنترل *PC-A-S*، در یک

شرایط مشابه عمل‌آوری شده (محیط تشدید یافته)، بیش‌تر از $2/5$ برابر بوده است، که نشان از عملکرد مناسب مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا در برابر واکنش قلیایی سیلیسی است. به عبارت دیگر، جایگزینی سیمان با سرباره فعال شده با قلیا، منجر به افزایش مقاومت فشاری در طرح‌های مورد بررسی شده است. به‌طور مثال، مقاومت فشاری نمونه *Slag-0.5-S* در مقایسه با نمونه *PC-A-S* در سنین یک، سه و شش ماهه، به‌ترتیب $2/7$ ، $2/7$ و $2/9$ برابر و مقاومت فشاری نمونه *Slag-0.8-S* نسبت به نمونه *PC-A-S* در همان سنین، به‌ترتیب $2/8$ ، $2/9$ و $3/2$ برابر، افزایش داشته است. علاوه بر این، محیط و شرایط نگهداری و عمل‌آوری در مقاومت فشاری مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، بسیار تاثیرگذار است. زیرا مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا و عمل‌آوری شده در محیط تشدید یافته نسبت به مخلوط‌های مشابه ولی عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاهی یا همان محیط کنترل، دارای مقاومت فشاری بیشتری بوده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر مثبت بالا بودن دما در فعال‌سازی سرباره است. حتی با بررسی و مقایسه نتایج نمونه‌های نگهداری شده در محیط کنترل با یکدیگر، مشخص می‌شود مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، نسبت به مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی، عملکردی مناسب داشته است.



شکل ۴-۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاهی (کنترل)



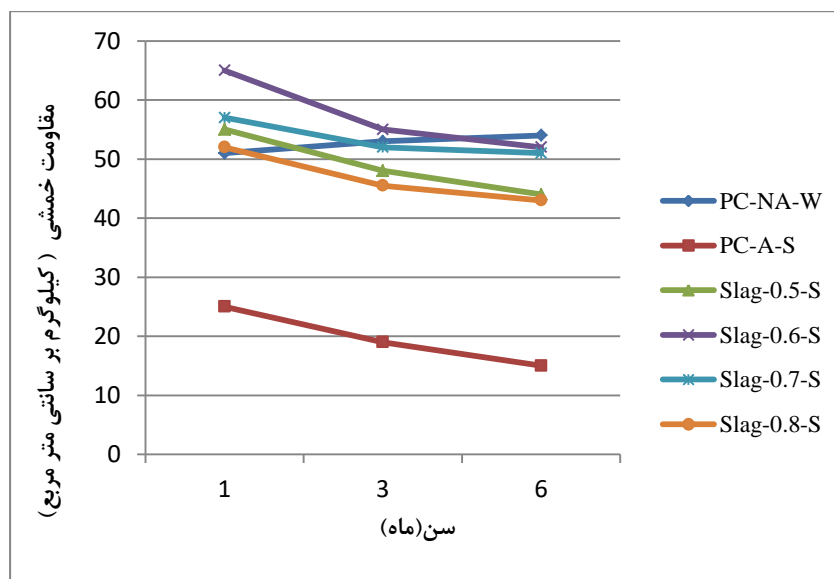
شکل ۴-۸ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده در محیط تشدید یافته

۴-۳-۳. نتایج مقاومت خمشی بتن

نتایج مقاومت خمشی یا همان مدول گسیختگی به روش چهار نقطه در شکل ۴-۹ ارائه شده است. با توجه به مساعد بودن شرایط برای وقوع واکنش قلیایی سیلیسی و روند کاهش مقاومت خمشی نمونه *PC-A-S* در طول آزمایش و همچنین کمتر بودن مقاومت خمشی نسبت به نتایج نمونه‌ی *PC-NA-W*، مشخص می‌شود واکنش مذکور در نمونه *PC-A-S* رخ داده و اثرگذاری واکنش در طول مدت آزمایش بر ساختار داخلی نمونه‌ی بتنی، منجر به کاهش مقاومت خمشی شده است. علاوه بر این، بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد این نتایج کاملاً با نتایج حاصل از آزمایش استاندارد *ASTM C1293* تسریع یافته و آزمایش مقاومت فشاری همسو بوده است. این نتایج را می‌توان با نتایج انبساط بدست آمده در آزمایش استاندارد *ASTM C1293* تسریع یافته مقایسه کرد. همان‌گونه که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، بخش عمده انبساط نمونه‌ها بخصوص در نمونه *PC-A-S* در سه ماهه اول رخ داده و پس از آن نرخ واکنش با گذشت زمان کاهش چشم‌گیری پیدا کرده است. بدین ترتیب، اثر هیدراسیون می‌تواند بر اثر واکنش قلیایی سیلیسی غالب شده و بازایی در مقاومت بتن پدیدار می‌شود. به عنوان مثال، از سن سه ماهه تا پایان آزمایش (شش ماه)، تنها ۰/۰۹ درصد به مقدار انبساط نمونه *PC-A-S* اضافه شده، در حالی‌که در سه ماهه نخست حدود ۰/۲۵ درصد انبساط اضافه شده است. بنابراین، نرخ انبساط نمونه *PC-A-S* با گذشت زمان، کاهش چشم‌گیری پیدا کرده است. پس انتظار افزایش مقادیر مقاومت‌های آن به صورت نسبی چندان دور از انتظار نیست. میزان مقاومت خمشی نمونه *PC-A-S* نسبت به نمونه *PC-NA-W*، در سنین یک، سه و شش ماهه به ترتیب، ۵۱، ۶۴ و ۷۲ درصد کاهش داشته است، در حالی‌که در همین سنین، مقاومت فشاری آن حدود ۳۶، ۴۲ و ۴۶ درصد کاهش را تجربه کرده است. این تفاوت بیانگر آن است که مشخصه‌های مکانیکی بتن اثرپذیری متفاوتی از واکنش قلیایی سیلیسی دارند. ضمناً حساسیت بالاتر مقاومت خمشی نسبت به

مقاومت فشاری در نمونه‌ی $PC-A-S$ نیز، کاملاً مشهود است. افت مقاومت خمشی نمونه $PC-A-S$ ، در سنین سه و شش ماه نسبت به سن یک‌ماهه به ترتیب ۲۴ و ۴۰ درصد بوده است که در واقع این روند کاهش، فزاینده بوده است. این موضوع در حالی است که میزان مقاومت فشاری برای نمونه $PC-A-S$ ، در سنین سه و شش ماهه نسبت به سن یک‌ماهه، به ترتیب ۶/۶ و ۴/۹ درصد افزایش ناچیزی (کم‌تر از ۱۰ درصد) داشته است. لذا براحتی می‌توان ملاحظه نمود که با رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی، تغییرات در مقادیر مقاومت خمشی نسبت به مقادیر مقاومت خمشی، به شدت بیشتر است.

علاوه‌بر این با ملاحظه نتایج مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا ملاحظه می‌شود این نمونه‌ها عملکرد مناسبی از خود تحت شرایط تشدید یافته، نشان داده‌اند. زیرا در تمامی سنین نتایج مقاومت خمشی مخلوط‌های فعال شده با قلیا نسبت به نمونه کنترل $PC-A-S$ ، بیش از دو برابر بوده است. به بیان دیگر، قلیائیت استفاده شده برای ساخت این نوع بتن‌ها، باعث تشدید واکنش قلیایی سیلیسی نگردیده است. علاوه‌بر این، با تغییر مقدار قلیائیت (نسبت سرباره به مواد قلیایی) چندان تغییر چشم‌گیری بین مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا مشاهده نشده است و نتایج تقریباً نزدیک بهم بوده و با گذشت زمان، مقاومت خمشی بتن‌های فعال شده با قلیا کاهش یافته است. به طور متوسط میزان کاهش مقاومت خمشی مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا در سنین سه و شش ماهه نسبت به سن یک‌ماهه، به ترتیب ۱۲/۴ و ۵/۳ درصد بوده است. این موضوع در حالی است که برای نمونه کنترل $PC-A-S$ ، همین موضوع به ترتیب برابر با ۲۴ و ۲۱ درصد بوده که نشان‌دهنده تأثیرپذیری کمتر مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا در برابر واکنش قلیایی سیلیسی است.

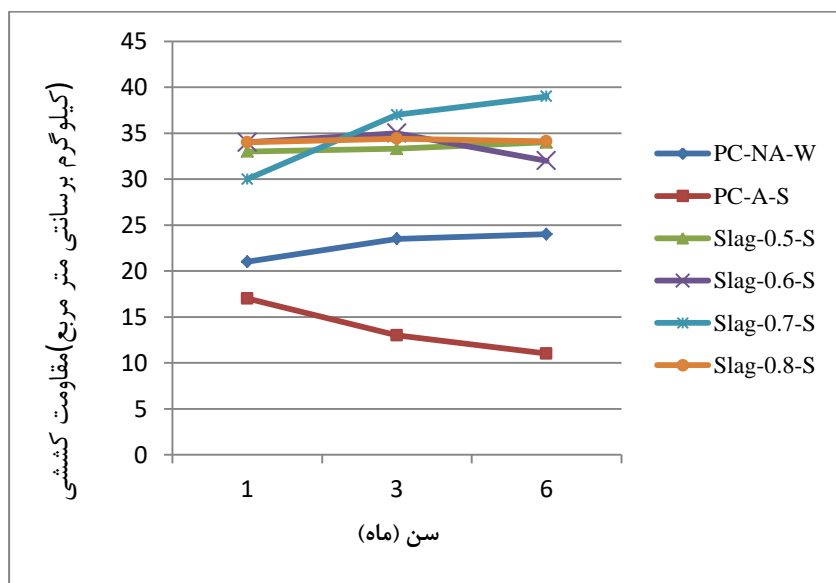


شکل ۴-۹ نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی

۴-۳-۴. نتایج مقاومت کششی بتن به روش دونیم‌شدن

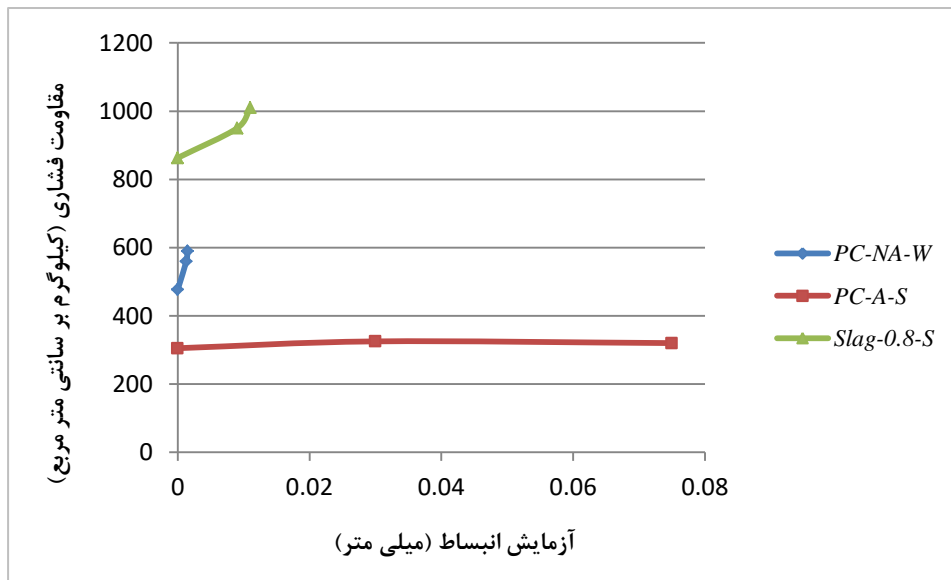
نتایج مقاومت کششی به روش دونیم‌شدن در شکل ۴-۱۰، ارائه شده است. نمونه کنترل *PC-A-S* (عمل‌آوری شده در محیط تشدید یافته)، به دلیل رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی در آن، نسبت به سایر نمونه‌ها، کمترین میزان مقاومت کششی را داشته است. همچنین، با گذشت زمان، مقاومت کششی همواره روندی کاهشی داشته است. به عنوان مثال، میزان مقاومت کششی نمونه‌ی *PC-A-S* در سنین یک، سه و شش‌ماهه در مقایسه با نمونه *PC-NA-W*، در همان سنین به ترتیب ۱۹، ۴۵ و ۵۴ درصد کاهش داشته است. علاوه بر این، افت مقاومت کششی نمونه *PC-A-S*، در سنین سه و شش ماه نسبت به سن یک‌ماهه به ترتیب ۲۴ و ۳۵ درصد بوده است و افزایش این روند کاهشی، تأییدی بر وقوع واکنش قلیایی سیلیسی سنگ‌دانه و نیز همسو با نتایج حاصل از انجام آزمایش انبساط (تغییرات طول) بوده است.

همان‌طور که از نتایج پیداست، نمونه‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نسبت به نمونه‌های کنترل عملکرد بهتری داشته‌اند؛ زیرا مقاومت کششی بالاتری از خود نشان داده‌اند و با افزایش مقادیر قلیائیت (نسبت محلول قلیایی به سرباره)، مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به یک‌دیگر اندکی افزایش داشته‌اند. هرچند که نتایج مقاومت کششی نمونه‌ی *Slag-0.5-S* با کمترین مقدار قلیائیت و نمونه *Slag-0.8-S* با بیشترین مقدار قلیائیت، تقریباً از نظر مقاومت کششی یکسان است. اما نمونه *Slag-0.7-S* بهترین نتیجه را داشته است، زیرا در این نمونه، همواره با گذشت زمان مقاومت کششی روندی افزایشی داشته است. به عبارت دیگر، براساس نتایج این آزمایش می‌توان مقدار بهینه قلیائیت در مخلوط‌های ساخته شده از سرباره فعال شده را برابر با ۰/۷ قلمداد نمود.

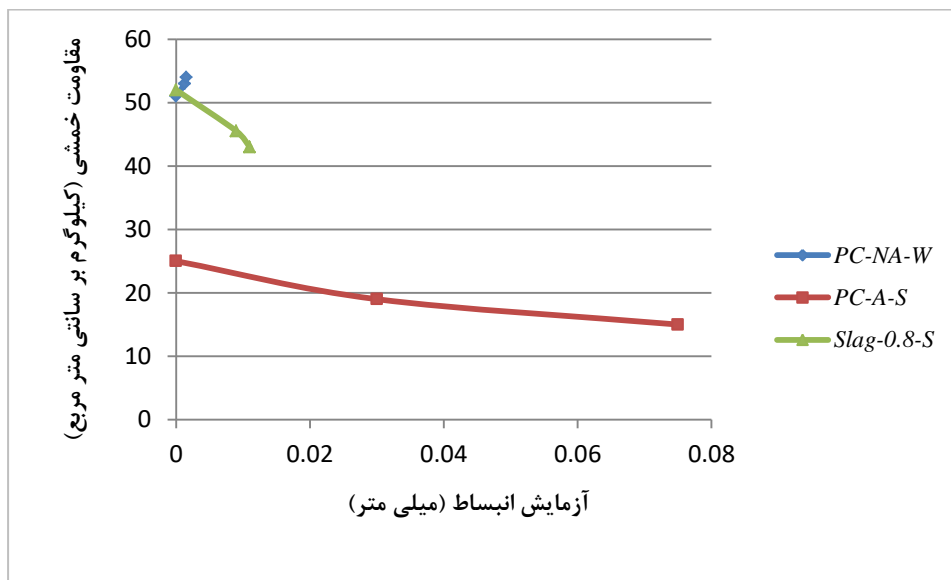


شکل ۴-۱۰ نتایج آزمایش مقاومت کششی به روش دونیم‌شدن نمونه‌های بتنی

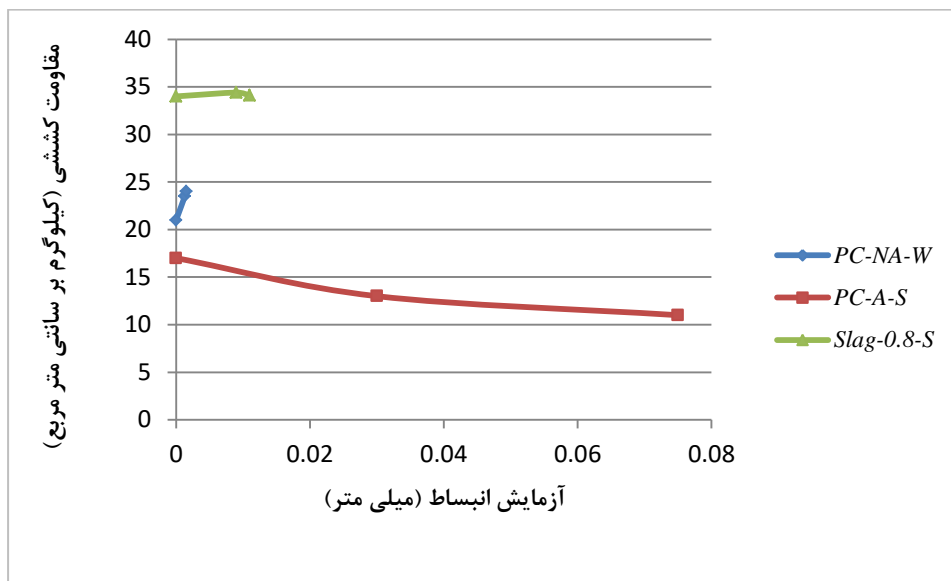
ادامه نتایج آزمایش انبساط (آزمایش استاندارد *ASTM C1293*) در مقابل مشخصه‌های مکانیکی، نمونه‌های کنترل (نمونه‌های شاهد) و یک نمونه‌ی دل‌خواه (نمونه *Slag-0.8-S*) از بتن‌های مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا ارائه شده است.



شکل ۴-۱۱ نتایج آزمایش انبساط در برابر مقاومت فشاری در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه)



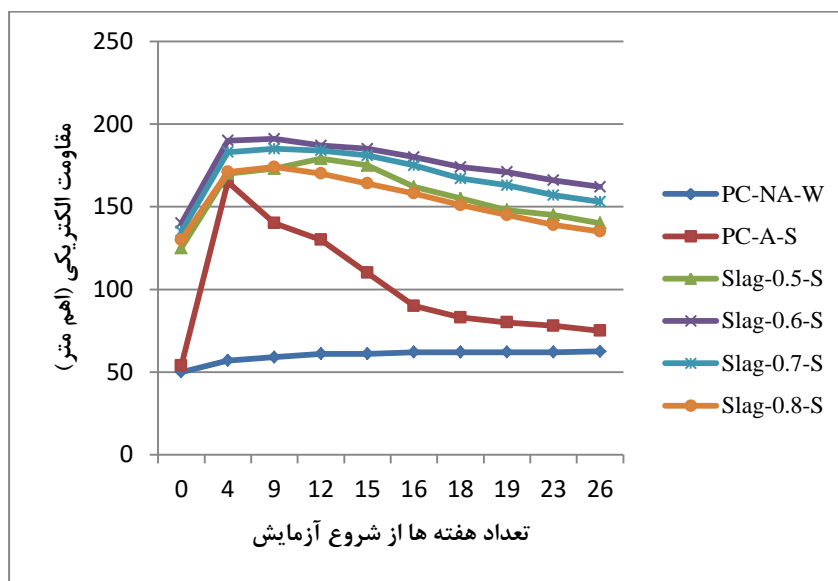
شکل ۴-۱۲ نتایج آزمایش انبساط در برابر مقاومت خمشی در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه)



شکل ۴-۱۳ نتایج آزمایش انبساط در برابر مقاومت کششی در طول مدت آزمایش (تا پایان شش ماه)

۴-۳-۵. نتایج مقاومت الکتریکی

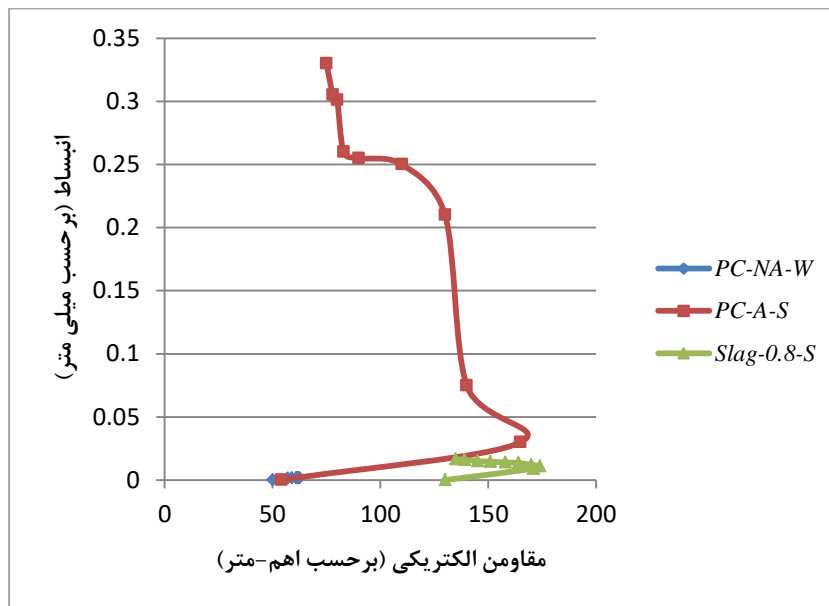
جهت ارزیابی دوام و بررسی تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی در ریز ساختار مخلوط‌های بتنی تهیه شده به بررسی مقاومت الکتریکی مخلوط‌ها پرداخته شده است. در هر مقطع زمانی که اقدام به قرائت مقاومت الکتریکی بتن گردید، نسبت به قرائت طول نمونه‌های منشوری بتنی نیز اقدام شد. در شکل ۴-۱۴، نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی ارائه شده است. همانطور که انتظار می‌رود، مقاومت الکتریکی نمونه بتن کنترل *PC-NA-W* نگهداری و عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاه (آب و آهک اشباع با دمای ۲۳ درجه سلسیوس)، در هر سن، کم‌ترین مقدار را نسبت به سایر نمونه‌ها داشته است. علاوه بر این، برخلاف سایر نمونه‌های بتنی مقاومت الکتریکی نمونه کنترل *PC-NA-W* با یک شیب ملایم روند افزایشی داشته است. به عبارتی دیگر، بعد از گذشت شش ماه، به میزان تقریبی ۲۵ درصد رشد داشته است؛ که مشابه این نتیجه در خصوص پارامترهای مکانیکی انجام شده بر روی نمونه کنترل *PC-NA-W* نیز بدست آمد. علت این موضوع را می‌توان به تشکیل محصولات هیدراسیون با ادامه‌دار شدن مدت زمان آزمایش نسبت داد. اما در نمونه کنترل *PC-A-S* که در محیط تشدید یافته عمل‌آوری و نگهداری شده است، نتایج نشان می‌دهد به دلیل تأثیر دمای زیاد در رشد سریع محصولات هیدراسیون و تشکیل ژل *C-S-H*، در یک‌ماهه نخست از عمر مخلوط‌ها، مقاومت الکتریکی با افزایش قابل توجهی (سه برابری) روبه‌رو بوده است. اما با تداوم انجام آزمایش‌ها در این طرح، مشخص شد این پارامتر با روندی کاهشی مواجه شده است. به عنوان مثال، پارامتر مقاومت الکتریکی پس از گذشت شش ماه نسبت به سن یک‌ماهه بیش از ۴۵ درصد، افت مقاومت الکتریکی داشته است. این موضوع را می‌توان به مساعد بودن شرایط انجام واکنش قلیایی سیلیسی به علت واکنش‌پذیر بودن سنگ‌دانه‌های مصرفی، دسترسی به رطوبت و دمای زیاد و نیز وجود منبع قلیایی در سیستم نسبت داد. همچنین، نتایج مقاومت الکتریکی، با نتایج آزمایش انبساط و آزمایش‌های مکانیکی صورت گرفته کاملاً همسو بوده است.



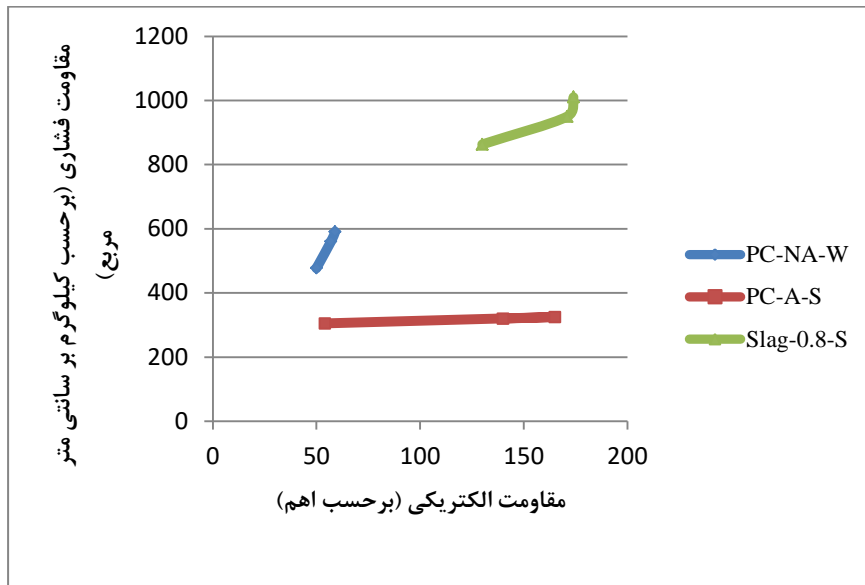
شکل ۴-۱۴ نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی

با دقت در نتایج مقاومت الکتریکی مخلوط‌های بتنی مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا که در محیط تشدید یافته عمل‌آوری و نگهداری شده بودند، مشخص شد مانند نمونه کنترل *PC-A-S* در یک‌ماهه نخست به دلیل سرعت بالا در تشکیل محصولات هیدراسیون و ژئوپلیمراسیون، مقاومت الکتریکی بیش از ۳۰ درصد رشد کرده است. اما با ادامه‌دار شدن آزمایش‌ها و وقوع واکنش قلیایی سیلیسی، مقاومت الکتریکی با روندی نسبتاً نزولی مواجه بوده است. در واقع نتایج شش‌ماهه نسبت به نتایج یک‌ماهه، بسته به نسبت مواد فعال‌ساز استفاده شده به سرباره کوره آهن‌گدازی، بین ۱۴ تا ۲۱ درصد، با کاهش مواجه بوده است. به کلی در نمونه کنترل *PC-A-S* و همچنین مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا به دلیل تشکیل سریع محصولات هیدراسیون و ژئوپلیمراسیون ابتدا شاهد افزایش مقاومت الکتریکی بوده‌ایم. با توجه به اینکه همه‌ی مخلوط‌ها حاوی سنگ‌دانه واکنش‌پذیر بوده و تحت محیط تشدید یافته عمل‌آوری و نگهداری شده‌اند و با ادامه‌دار شدن مدت زمان آزمایش، واکنش مخرب قلیایی سیلیسی رخ داده است و نیز محصولات مخرب واکنش بر محصولات هیدراسیون غالب شده و در نتیجه مقاومت الکتریکی روند کاهشی از خود نشان داده است. علاوه بر این با توجه به نتایج، مشخص می‌شود که مقدار اولیه مقاومت الکتریکی مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نسبت به نمونه کنترل *PC-A-S*، بیش از دو برابر بوده و مقدار مقاومت الکتریکی مخلوط‌های فعال شده با قلیا در سن یک‌ماهه ۳ الی ۱۵ درصد و در سن شش‌ماهه حدوداً دو برابر، بسته به نسبت فعال‌ساز به سرباره، بیشتر از نمونه کنترل *PC-A-S* بوده است. این موضوع نشان می‌دهد مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا در همان سنین اولیه مقاومت الکتریکی بالای دارند، ثانیاً کمترین مقدار افت مقاومت الکتریکی در اثر وقوع واکنش قلیایی سیلیسی را از خود نشان داده‌اند؛ در نتیجه عملکرد مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا از حیث دوام بسیار مناسب ارزیابی می‌شود. ضمناً ارتباط معنادار بین انبساط تولید شده و مقاومت الکتریکی طرح‌های تحت

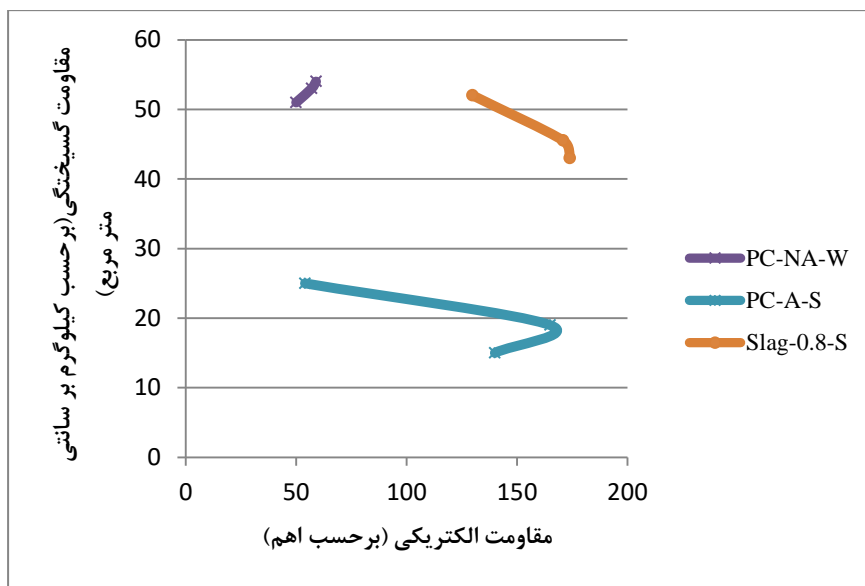
بررسی در پژوهش حاضر، بیانگر آن است که مقاومت الکتریکی بتن، پتانسیل زیادی را جهت استفاده کردن به عنوان یک روش آزمون جدید، جهت ارزیابی واکنش پذیری سنگ‌دانه‌ها داراست. در این تحقیق تنها به بررسی سطحی مقاومت الکتریکی و اثرپذیری آن از وقوع واکنش قلیایی سیلیسی پرداخته شده است، اما با توجه به روابط موجود و همچنین هم‌بستگی قوی که بین انبساط تولید شده و مقاومت الکتریکی بتن وجود دارد، می‌توان معیارها و ضوابط مشخصی برای آن قرار داد که به وسیله آن بتوان از این خاصیت بتن به عنوان روشی استاندارد استفاده کرد. این کار را می‌توان برای سایر مشخصه‌های مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، کششی و خمشی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت، نیز انجام داد. ادامه نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در مقابل مشخصه‌های مکانیکی نمونه‌های کنترل (نمونه‌های شاهد) و یک نمونه‌ی دل‌خواه (نمونه $Slag-0.8-S$) از بتن‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا ارائه شده است.



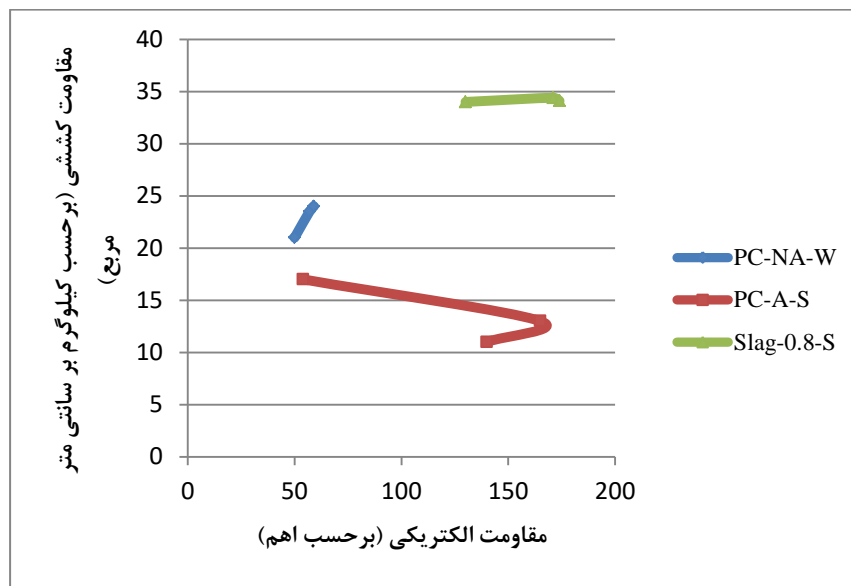
شکل ۴-۱۵ نتایج مقاومت الکتریکی در برابر انبساط (تغییرات طول) در طول مدت آزمایش (تا پایان شش‌ماه)



شکل ۴-۱۶ نتایج مقاومت الکتریکی در برابر مقاومت فشاری در طول مدت آزمایش (تا پایان شش ماه)



شکل ۴-۱۷ نتایج مقاومت الکتریکی در برابر مقاومت خمشی در طول مدت آزمایش (تا پایان شش ماه)



شکل ۴-۱۸ نتایج مقاومت الکتریکی در برابر مقاومت کششی در طول مدت آزمایش (تا پایان شش ماه)

۴-۴. جمع بندی

در این پژوهش، سعی شده است نسبت به وجود یا عدم وجود رابطه بین پارامترهای تغییرات طول، مقاومت فشاری، کششی و خمشی با مقاومت الکتریکی بتن بررسی صورت گیرد و در صورت وجود این ارتباط بتوان از تعیین مقاومت الکتریکی به عنوان یک روش جدید ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی بتن یاد نمود. پس انجام آزمایش‌های مربوطه و ارزیابی نرخ تغییرات (رشد یا افت) نتایج بدست آمده در طول آزمایش، شدت حساسیت و اثرپذیری هر یک از خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی تحت اثر آسیب‌های ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی و نیز میزان کنترل واکنش قلیایی سیلیسی با بکارگیری مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا، مشخص گردید. به همین منظور درصد نرخ تغییرات (رشد یا افت) خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی سنین سه‌ماهه نسبت به یک‌ماهه در جدول ۴-۱ و شش‌ماهه نسبت به یک‌ماهه در جدول ۴-۲ ارائه شده است. به‌طور کلی نتایج هر دو جدول همسو بوده است. همان‌طور که قبلاً بحث و بررسی شد عملکرد مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نسبت به مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی بسیار مطلوب بوده است. به همین دلیل در جداول ۴-۱ و ۴-۲ به عنوان نمونه، تنها از نتایج طرح *Slag-0.8-S* برای بررسی حساسیت و اثرپذیری خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی استفاده شده است.

نتایج کلی جدول ۴-۱ به شرح زیر است:

الف- نمونه کنترل (شاهد) *PC-NA-W* با یک روند آهسته، همواره در حال رشد بوده است که نشان‌دهنده عدم وقوع واکنش قلیایی سیلیسی است. در این نمونه، با افزایش سن نمونه‌ها کلیه خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی افزایش یافته است، اما مقادیر نرخ رشد مقاومت فشاری و خمشی با یکدیگر تفاوتی معنادار دارند. به‌طور مثال این میزان برای این دو پارامتر به ترتیب برابر با ۱۷ و ۴ درصد بوده است.

ب- عمل‌آوری و نگهداری نمونه کنترل (شاهد) *PC-A-S* در محیط تشدید یافته، منجر به وقوع واکنش قلیایی سیلیسی شده و با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول ۴-۱، مشخص می‌شود مقاومت فشاری رشد داشته است اما مقدار رشد مقاومت فشاری تنها ۶/۶٪ بوده است که نشان از تاثیر واکنش مخرب قلیایی سیلیسی بر سرعت رشد مقاومت فشاری بوده است. اما مقاومت‌های خمشی و کششی و الکتریکی نه تنها رشد مقاومتی نداشته‌اند، بلکه به شدت افت نیز داشته است. که موضوع نشان‌دهنده بالا بودن حساسیت و اثرپذیری مقاومت‌های خمشی و کششی و الکتریکی نسبت به مقاومت فشاری از آسیب‌های واکنش قلیایی سیلیسی است.

پ- با توجه به افت مقاومت خمشی و الکتریکی، می‌توان عنوان نمود که واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نیز نظیر طرح *Slag-0.8-S* رخ داده و همچنین، رشد آهسته و کند مقاومت فشاری و کششی نمونه *Slag-0.8-S* نسبت به نمونه *PC-NA-W* از طرف دیگر، رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی را تأیید می‌کند. نمونه *Slag-0.8-S*، در کنترل و مهار واکنش قلیایی سیلیسی عملکرد مناسب داشته است زیرا رشد مقاومت فشاری آن نسبت به نمونه *PC-A-S* مقداری بیشتر بوده است و همچنین مقاومت‌های خمشی و الکتریکی افت کمتری نسبت به نمونه *PC-A-S*، تحت آسیب‌های ناشی از واکنش از خود نشان داده است. حتی نمونه *Slag-0.8-S* برخلاف نمونه *PC-A-S* افت مقاومت کششی نیز نداشته است. از آنجاکه نمونه *Slag-0.8-S* با ۱۲/۵٪ بیشترین مقدار افت مقاومت خمشی را نسبت به سایر مقاومت‌ها داشته است، این موضوع را می‌توان نشان از حساسیت و اثرپذیری بالای مقاومت خمشی از آسیب‌های ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی عنوان نمود.

ت- فاصله‌ی بین تغییرات (میزان افت) خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی، نمونه *PC-A-S* (نمونه‌ای که در آن واکنش به صورت معنادار رخ داده است) از نمونه *PC-NA-W* (به هیچ عنوان در آن واکنش رخ نداده است)، نشان می‌دهد خواص و ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت الکتریکی مخلوط پتانسیل خوبی برای استفاده کردن به عنوان روشی استاندارد جهت ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی را دارا هستند. به عنوان مثال، طبق جدول ۴-۱ مقاومت کششی با بیشترین فاصله یعنی ۳۶ درصد و مقاومت‌های الکتریکی و خمشی، هرکدام ۲۸ درصد، شدت تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی بر نمونه‌ای که در آن واکنش رخ داده است را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان عنوان نمود می‌توان از خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی جهت ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی، با دقت بالا استفاده نمود. هرچند به بررسی و مطالعات بیشتری نیازمند است.

ث- با توجه به نتایج جدول ۴-۱، با جایگزینی نمونه *Slag-0.8-S* به جای نمونه *PC-A-S* به منظور کاهش و بهبود آسیب‌های ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی، بیشترین ترتیب اثر مثبت (تأثیر مثبت مخلوط فعال شده با قلیا) در نتایج مقاومت کششی (۲۵٪) اختصاص دارد و پس از آن بترتیب در نتایج مقاومت‌های الکتریکی (۲۰/۴٪)، خمشی (۱۱/۵٪) و فشاری (۳/۴٪) نمایان شده است.

جدول ۱-۴ مقدار رشد و یا افت خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی سه ماهه نسبت به یک ماهه

توضیحات	مقاومت الکتریکی	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	مقاومت فشاری	نسبت سه ماهه به یک ماهه
واکنش رخ نداده است. زیرا همواره همه مقاومت‌ها بایک روند آهسته در حال رشد بوده است.	+۷٪	+۱۲٪	+۴٪	+۱۷٪	نمونه کنترل <i>PC-NA-W</i>
واکنش رخ داده است زیرا نرخ رشد مقاومت فشاری به شدت کم و نرخ افت سایر مقاومت‌ها به شدت زیاد بوده است.	-۲۱٪	-۲۴٪	-۲۴٪	+۶/۶٪	نمونه کنترل <i>PC-A-S</i>
واکنش کنترل شده است. زیرا نرخ رشد مقاومت فشاری بیشتر از نمونه <i>PC-A-S</i> شده است و همچنین نرخ افت سایر مقاومت‌ها به شدت کمتر از نمونه <i>PC-A-S</i> بوده است.	-۰/۶٪	+۱٪	-۱۲/۵٪	+۱۰٪	نمونه مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا <i>Slag-0.8-S</i>
با توجه به نتایج ارزیابی واکنش مبتنی بر خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی آن هم با دقت بالا و اطمینان بیشتر را تایید می‌کند.	۲۸٪	۳۶٪	۲۸٪	۱۰/۴٪	میزان افت خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی نمونه واکنش رخ داده (<i>PC-A-S</i>) و نمونه واکنش رخ نداده (<i>PC-NA-W</i>) است.
کاهش نرخ افت مقاومت‌ها نشان از کنترل شدن واکنش توسط مخلوط-های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا نظیر <i>Slag-0.8-S</i> را تایید می‌کند.	۲۰/۴٪	۲۵٪	۱۱/۵٪	۳/۴٪	میزان اثرگذاری مثبت نمونه <i>Slag-0.8-S</i> در کنترل واکنش نسبت به نمونه <i>PC-A-S</i>

در واقع جهت اعتبار و اطمینان بیشتر از نتایج پژوهش، روند انجام آزمایش‌ها تا سن شش ماهه نیز ادامه یافت. در جدول ۲-۴، نیز درصد رشد و یا افت خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی در سن شش ماهه نسبت به سن یک‌ماهه ارائه شده است. به طور کلی نتایج هر دو جدول، کاملاً با یکدیگر همسو بوده است.

جدول ۴-۲ مقدار رشد و یا افت خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی شش ماهه نسبت به یک ماهه

توضیحات	مقاومت فشاری	مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت الکتریکی	نسبت شش ماهه به یک ماهه
با توجه به همسو بودن نتایج هر دو جداول ۱-۴ و ۲-۴، در نتیجه توضیحات دقیقاً منطبق با توضیحات جدول ۱-۴ می باشد.	+۲۴٪	+۶٪	+۱۴٪	+۱۰٪	نمونه کنترل <i>PC-NA-W</i>
	+۵٪	-۴۰٪	-۳۵٪	-۵۵٪	نمونه کنترل <i>PC-A-S</i>
	+۱۷٪	-۱۷٪	+۰/۳٪	-۲۱٪	نمونه مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا <i>Slag-0.8-S</i>
	۲۱٪	۴۶٪	۴۹٪	۶۵٪	میزان افت خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی نمونه واکنش رخ داده (<i>PC-A-S</i>) و نمونه واکنش رخ نداده (<i>PC-NA-W</i>) است.
	۱۲٪	۲۳٪	۳۵٪	۳۴٪	میزان اثرگذاری مثبت نمونه <i>Slag-0.8-S</i> در کنترل واکنش نسبت به نمونه <i>PC-A-S</i>

همان طور که قبلاً نیز گفته شد، خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی، قابلیت این موضوع را دارند که جهت ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی مورد استفاده قرار گیرند. در جدول ۴-۳، درجه بندی میزان حساسیت و اثرگذاری خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی از واکنش قلیایی سیلیسی براساس جداول ۱-۴ و ۲-۴ ارائه شده است. اما به طور کلی استفاده از مقاومت الکتریکی توصیه می شود. زیرا نتایج این پارامتر، نشان داد که میزان پیشرفت واکنش قلیایی سیلیسی و میزان مقاومت الکتریکی بتن همخوانی و ارتباط مناسبی با یکدیگر دارند، به گونه ای که می توان از نتایج این آزمایش جهت ارزیابی واکنش پذیری سنگدانه ها استفاده نمود.

جدول ۳-۴ درجه بندی میزان حساسیت و اثرگذاری خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی از واکنش قلیایی سیلیسی (مخلوط-های بتنی)

مدت زمان آزمایش	مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی	مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا
کوتاه مدت (سه ماهه)	کششی < الکتریکی \cong خمشی < فشاری	کششی < الکتریکی < خمشی < فشاری
کوتاه مدت (شش ماهه)	الکتریکی < کششی < خمشی < فشاری	کششی \cong الکتریکی < خمشی < فشاری

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵- ۱. مقدمه

در این فصل سعی بر آن شده که خلاصه‌ای از نتایج نهایی از تحقیق و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه گردد.

۵- ۲. نتایج

در پژوهش حاضر ضمن بررسی واکنش‌پذیری سنگدانه‌های تهیه شده از یکی از معادن آذربایجان شرقی به بررسی روند توسعه خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا پرداخته شده است. از نتایج تحقیق حاضر به نتیجه‌گیری‌های زیر می‌توان اشاره نمود:

سنگدانه مورد استفاده در این تحقیق براساس نتایج آزمایش کوتاه مدت *ASTM C1260* و آزمایش بلند مدت *ASTM C1293* تسریع‌شده، از لحاظ واکنش قلیایی سیلیسی بسیار واکنش‌پذیر بوده است. استفاده از مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال شده با قلیا و با هدف حذف کامل سیمان پرتلند معمولی در هر دو آزمایش کوتاه مدت و بلند مدت باعث کاهش انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی شده است. همچنین، با وجود قلیائیت بالا به منظور فعال‌سازی سرباره، از نتایج آزمایش‌های کوتاه مدت و بلند مدت مشخص شد انبساط در این مخلوط‌ها بسیار کمتر از حد مجاز درج شده در آزمایش استاندارد کوتاه مدت *ASTM C1260* و آزمون استاندارد بلند مدت تسریع‌شده *ASTM C1293* بوده است. در نتیجه با توجه به عملکرد مناسب مخلوط‌های فعال‌شده با قلیا نسبت به مخلوط‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی می‌توان در کنترل واکنش قلیایی سیلیسی از مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا استفاده نمود. نتایج مشخصه‌های مکانیکی و دوامی نیز همین موضوع را تأیید می‌کند.

بررسی مشخصه‌های مکانیکی تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی نشان داد، رخ دادن واکنش قلیایی سیلیسی سبب تضعیف ساختار داخلی بتن و کاهش مقاومت آن می‌شود. از میان مشخصه‌های مورد بررسی در این تحقیق (مقاومت فشاری، خمشی و کششی)، مقاومت فشاری اگرچه تحت تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی قرار گرفته اما نسبت به سایر پارامترها، اثرپذیری کم‌تری از واکنش داشته است. اما مقاومت‌های خمشی و کششی تأثیرپذیری بیش‌تری از واکنش قلیایی سیلیسی داشته و وقوع واکنش منجر به کاهش مقاومت برخی از نمونه‌ها حتی تا ۴۰ درصد نیز شده است. همین موضوع در نتایج حاصل از مخلوط‌های مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا همسو بوده است. به بیان دیگر تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی در مخلوط‌هایی مبتنی بر سرباره فعال‌شده با قلیا به ترتیب مقاومت‌های کششی، خمشی و فشاری بیشترین اثرپذیری را از واکنش مذکور داشته است.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی یک روش جدید جهت ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی با استفاده از مقاومت الکتریکی بتن بود. نتایج حاصل نشان دادند که مقاومت الکتریکی بتن اثرپذیری زیادی از واکنش قلیایی سیلیسی داشته و می‌تواند معیار خوبی برای ارزیابی آن باشد. یکی از مسائلی که در پژوهش‌های پیشین به آن اشاره شده بود، عدم توانایی آزمایش‌های مبتنی بر انبساط برای آشکار

ساختن میزان تضعیف ساختار داخلی بتن تحت اثر واکنش قلیایی سیلیسی است. در این تحقیق نتایج آزمایش‌های انبساط‌ها با نتایج حاصل از آزمایش مشخصه‌های مکانیکی، دلیلی بر این مدعا بوده و آن‌ها را تأیید می‌کند.

۵-۳. پیشنهادها

- تحقیقات متعدد دیگری می‌توان در ادامه این پژوهش انجام داد. از جمله پژوهش‌های جذاب برای آینده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- بررسی تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی بر مشخصه‌های مکانیکی در طیف گسترده‌تری از سنگدانه‌ها با درجه واکنش‌پذیری‌های مختلف
 - تعیین معیارهایی برای مشخصه‌های مکانیکی به عنوان روشی استاندارد برای ارزیابی واکنش قلیایی سیلیسی
 - بررسی مقاومت الکتریکی و اثر واکنش قلیایی سیلیسی بر آن در سنگدانه‌هایی با درجه واکنش‌پذیری مختلف و تعیین معیارهایی جهت ارائه کردن به عنوان روشی استاندارد
 - بررسی دیگر مواد پایه‌ای به عنوان جایگزین کامل سیمان پرتلند معمولی
 - بررسی انواع مواد فعال‌ساز قلیایی، استفاده از چند نوع مواد فعال‌ساز، نسبت ترکیب مواد فعال‌ساز قلیایی و غلظت‌های فعال‌ساز
 - بررسی اثر واکنش قلیایی سیلیسی بر مشخصه‌های مکانیکی مخلوط‌های مبتنی بر مواد پایه‌ای فعال شده با قلیا

منابع

- 1- Brough, A. R., & Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and concrete research*, 32(6), 865-879.
- 2- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2002). Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete research*, 32(2), 211-216.
- 3- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2003). Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete research*, 33(10), 1607-1611.
- 4- Bondar, D., Ma, Q., Soutsos, M., Basheer, M., Provis, J. L., & Nanukuttan, S. (2018). Alkali activated slag concretes designed for a desired slump, strength and chloride diffusivity. *Construction and Building Materials*, 190, 191-199.
- 5- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and concrete research*, 41(12), 1232-1243.
- 6- Visser, J. H. M. (2018). Fundamentals of alkali-silica gel formation and swelling: Condensation under influence of dissolved salts. *Cement and Concrete Research*, 105, 18-30.
- 7- Pignatelli, R., Comi, C., & Monteiro, P. J. (2013). A coupled mechanical and chemical damage model for concrete affected by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 53, 196-210.
- 8- Wang, W., & Noguchi, T. (2020). Alkali-silica reaction (ASR) in the alkali-activated cement (AAC) system: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 252, 105-119.
- 9- Kandasamy, S., & Shehata, M. H. (2014). The capacity of ternary blends containing slag and high-calcium fly ash to mitigate alkali silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, 49, 92-99.
- 10- Tänzer, R., Jin, Y., & Stephan, D. (2017). Effect of the inherent alkalis of alkali activated slag on the risk of alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 98, 82-90.
- 11- Mahyar, M., Erdoğan, S. T., & Tokyay, M. (2018). Extension of the chemical index model for estimating Alkali-Silica reaction mitigation efficiency to slags and natural pozzolans. *Construction and Building Materials*, 179, 587-597.
- 12- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.
- ۱۳- آدام نویل، جی.جی. بروکس (۱۳۹۰). *تکنولوژی بتن، ترجمه رمضانپور و شاه نظری. انتشارات علم و صنعت ۱۱۰ و انتشارات پرهام، تهران.*
- 14- Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
- 15- Ramezani-pour, A. A., Kazemian, A., Sarvari, M., & Ahmadi, B. (2013). Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low Portland cement

- content and high durability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(5), 589-596.
- 16- Ramezaniapor, A., Bahman Zadeh, F., Zolfagharnasab, A., & Ramezaniapor, A. M. (2018). Studying the Effect of the Amount of Source Materials and Water to Binder Ratio on Chloride Ions Ingress in Alkali-Activated Slag Concretes. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4), 673-684.
 - 17- Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, 6(2), 263-278.
 - 18- Ojha, A., & Aggarwal, P. (2021). Fly Ash Based Geopolymer Concrete: a Comprehensive Review. *Silicon*, 1-20.
 - 19- Cheng, T. W., & Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals engineering*, 16(3), 205-210.
 - 20- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of cleaner production*, 19(9-10), 1080-1090.
 - 21- Zhang, D. W., Zhao, K. F., Xie, F. Z., Li, H., & Wang, D. M. (2020). Effect of water-binding ability of amorphous gel on the rheology of geopolymer fresh pastes with the different NaOH content at the early age. *Construction and Building Materials*, 261, 120529.
 - 22- Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology In: Proceedings of 99 International Conference. eds. Joseph Davidovits, R. Davidovits & C. James, France.
 - 23- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., & Ramezaniapor, A. A. (2011). Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans. *Construction and Building Materials*, 25(10), 4065-4071.
 - 24- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., & Ramezaniapor, A. A. (2011). Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 251-260.
 - 25- Komljenović, M., Bašćarević, Z., & Bradić, V. (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 35-42.
 - 26- Piatak, N. M., Parsons, M. B., & Seal II, R. R. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 57, 236-266.
 - 27- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.
 - 28- Wallah, S., & Rangan, B. V. (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties.
 - 29- Gourley, T., Duxson, P., Setunge, S., Lloyd, N., Dechsler, M., & South, W. (2011). Recommended Practice: Geopolymer Concrete. Concrete Institute of Australia.

- 30- ASTM, C. (2012). 989: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concretes and Mortars.[book auth.]. ASTM International. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken: International, ASTM.
- 31- Nkinamubanzi, P. C., Baalbaki, M., Bickley, J., & Aitcin, P. C. (1998). The use of slag for making high performance concrete. In 6^o NCB International Seminar on Cement and Bulding Materials. NBC.
- 32- Pal, S. C., Mukherjee, A., & Pathak, S. R. (2003). Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1481-1486.
- 33- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and concrete research*, 41(12), 1244-1256.
- 34- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, 41(7), 750-763.
- 35- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindaprasit, P. (Eds.). (2014). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Elsevier.
- 36- Burciaga-Díaz, O., & Escalante-García, J. I. (2013). Structure, mechanisms of reaction, and strength of an alkali-activated blast-furnace slag. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(12), 3939-3948.
- 37- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer chemistry and applications*. Geopolymer Institute.
- 38- Davidovits, J. (1994, October). Properties of geopolymer cements. In *First international conference on alkaline cements and concretes (Vol. 1, pp. 131-149)*. Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials.
- 39- Comrie, D. C., & Kriven, W. M. (2004). Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application. In *Advances in Ceramic Matrix Composites IX, Proceedings (pp. 211-225)*.
- 40- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2011). Compatibility studies between NASH and CASH gels. Study in the ternary diagram Na₂O–CaO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 923-931.
- 41- García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Macphee, D. E. (2010). Effect of calcium additions on N–A–S–H cementitious gels. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(7), 1934-1940.
- 42- García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2013). Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash–portland cement blends. *Cement and concrete research*, 52, 112-122.
- 43- Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Advances in cement research*, 7(27), 93-102.

- 44- Huanhai, Z., Xuequan, W., Zhongzi, X., & Mingshu, T. (1993). Kinetic study on hydration of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, 23(6), 1253-1258.
- 45- Myers, R. J., Bernal, S. A., San Nicolas, R., & Provis, J. L. (2013). Generalized structural description of calcium–sodium aluminosilicate hydrate gels: the cross-linked substituted tobermorite model. *Langmuir*, 29(17), 5294-5306.
- 46- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International journal of mineral processing*, 59(3), 247-266.
- 47- Bondar, D. (2009). Alkali activation of Iranian natural pozzolans for producing geopolymer cement and concrete (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- 48- Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Firouz, R. M., & Illikainen, M. (2018). Drying shrinkage in alkali-activated binders—a critical review. *Construction and Building Materials*, 190, 533-550.
- 49- Li, Z., Nedeljković, M., Chen, B., & Ye, G. (2019). Mitigating the autogenous shrinkage of alkali-activated slag by metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 122, 30-41.
- 50- Stanton, T. E. (1942). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 107(1), 54-84.
- 51- Grattan-Bellew, P. E., Mitchell, L. D., Margeson, J., & Min, D. (2010). Is alkali–carbonate reaction just a variant of alkali–silica reaction ACR= ASR?. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 556-562.
- 52- Katayama, T. (1992, July). A critical review of carbonate rock reactions—Is their reactivity useful or harmful. In *Proceeding of the 9th International Alkali–Aggregate Reactions Conference*, London, Concrete Society, Slough, Publ. CS-104 (pp. 508-518).
- 53- Feldman, R. F., & Sereda, P. J. (1961). Characteristics of sorption and expansion isotherms of reactive limestone aggregate. *J. Am. Concr. Inst.*, 58(2), 203-14.
- 54- Gillott, J. E., & Swenson, E. G. (1969). Mechanism of the alkali-carbonate rock reaction. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 2(1), 7-23.
- 55- ASTM. (2007). ASTM C1260: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar–bar method). 2009 ASTM Annual Book of Standards, Volume 04• 02, Concrete and Aggregates.
- 56- ASTM. (2008). Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction.
- 57- ASTM, C. (2003). 295. Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- 58- Abdelrahman, M., ElBatanouny, M. K., Ziehl, P., Fasl, J., Larosche, C. J., & Fraczek, J. (2015). Classification of alkali–silica reaction damage using acoustic emission: A proof-of-concept study. *Construction and Building Materials*, 95, 406-413.

- 59- Feng, X., Thomas, M. D. A., Bremner, T. W., Folliard, K. J., & Fournier, B. (2010). New observations on the mechanism of lithium nitrate against alkali silica reaction (ASR). *Cement and Concrete Research*, 40(1), 94-101.
- 60- Saha, A. K., Khan, M. N. N., Sarker, P. K., Shaikh, F. A., & Pramanik, A. (2018). The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review. *Construction and Building Materials*, 171, 743-758.
- 61- Bleszynski, R. F., & Thomas, M. D. (1998). Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions. *Advanced Cement Based Materials*, 7(2), 66-78.
- 62- Bektas, F., Turanli, L. U. T. F. U. L. L. A. H., Topal, T. A. M. E. R., & Goncuoglu, M. C. (2004). Alkali reactivity of mortars containing chert and incorporating moderate-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2209-2214.
- 63- Bektas, F., Topal, T. A. M. E. R., Goncuoglu, M. C., & Turanli, L. U. T. F. U. L. L. A. H. (2008). Evaluation of the alkali reactivity of cherts from Turkey. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1183-1190.
- 64- Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J. H., & Thomas, M. D. (2015). Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cement and Concrete Research*, 76, 130-146
- 65- Gholizadeh-Vayghan, A., & Rajabipour, F. (2017). The influence of alkali-silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapor. *Cement and Concrete Research*, 94, 49-58
- 66- Stark, D. (1991). THE HANDBOOK FOR THE IDENTIFICATION OF ALKALII-SILICA REACTIVITY IN HIGHWAY STRUCTURES (No. SHRP-C/FR-91-101).
- 67- Swamy, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. CRC Press, 2002.
- 68- Thaulow, N., Jakobsen, U. H., & Clark, B. (1996). Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses. *Cement and Concrete Research*, 26(2), 309-318.
- 69- Vayghan, A. G., Rajabipour, F., & Rosenberger, J. L. (2016). Composition-rheology relationships in alkali-silica reaction gels and the impact on the gel's deleterious behavior. *Cement and Concrete Research*, 83, 45-56.
- 70- Giorla, A. B., Scrivener, K. L., & Dunant, C. F. (2015). Influence of viscoelasticity on the stress development induced by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 70, 1-8.
- 71- Abbas, S., Kazmi, S. M., & Munir, M. J. (2017). Potential of rice husk ash for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates. *Construction and Building Materials*, 132, 61-70.
- 72- Ferraris, C. F., Clifton, J. R., & Garboczi, E. J. (1997). REACTIONS IN MORTARS. Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems, 75.
- 73- Xu, Z., Lan, X., Deng, M., & Tang, M. (2002). A new accelerated method for determining the potential alkali-carbonate reactivity. *Cement and concrete research*, 32(6), 851-857.

- 74- Schlangen, E., & Çopuroglu, O. (2007). Concrete damage due to alkali-silica reaction: A new method to determine the properties of expansive gel. *Fracture mechanics of concrete and concrete structures-high-performance concrete, brick-masonry and environmental aspects*. Taylor & Francis Group, London, 1835-1841.
- 75- Leemann, A., Le Saout, G., Winnefeld, F., Rentsch, D., & Lothenbach, B. (2011). Alkali-silica reaction: the influence of calcium on silica dissolution and the formation of reaction products. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(4), 1243-1249.
- 76- Shafaatian, S. M., Akhavan, A., Maraghechi, H., & Rajabipour, F. (2013). How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)? *Cement and Concrete Composites*, 37, 143-153.
- 77- Kim, T., Olek, J., & Jeong, H. (2015). Alkali-silica reaction: kinetics of chemistry of pore solution and calcium hydroxide content in cementitious system. *Cement and Concrete Research*, 71, 36-45.
- 78- Shi, Z., & Lothenbach, B. (2020). The combined effect of potassium, sodium and calcium on the formation of alkali-silica reaction products. *Cement and Concrete Research*, 127, 105914.
- 79- Utton, C. A., Hand, R. J., Bingham, P. A., Hyatt, N. C., Swanton, S. W., & Williams, S. J. (2013). Dissolution of vitrified wastes in a high-pH calcium-rich solution. *Journal of nuclear materials*, 435(1-3), 112-122.
- 80- Maraghechi, H., Rajabipour, F., Pantano, C. G., & Burgos, W. D. (2016). Effect of calcium on dissolution and precipitation reactions of amorphous silica at high alkalinity. *Cement and Concrete Research*, 87, 1-13.
- 81- Thomas, M. (2001). The role of calcium hydroxide in alkali recycling in concrete. *Materials Science of Concrete Special*, 225-236.
- 82- Krivenko, P., Drochytka, R., Gelevera, A., & Kavalerova, E. (2014). Mechanism of preventing the alkali-aggregate reaction in alkali activated cement concretes. *Cement and Concrete Composites*, 45, 157-165.
- 83- Struble, L. J., & Diamond, S. (1981). Swelling properties of synthetic alkali silica gels. *Journal of the American ceramic society*, 64(11), 652-655.
- 84- Bleszynski, R. F., & Thomas, M. D. (1998). Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions. *Advanced Cement Based Materials*, 7(2), 66-78.
- 85- Oka, Y., & Tomozawa, M. (1980). Effect of alkaline earth ion as an inhibitor to alkaline attack on silica glass. *Journal of non-crystalline solids*, 42(1-3), 535-543.
- 86- Iler, R. K. (1973). Effect of adsorbed alumina on the solubility of amorphous silica in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 43(2), 399-408.
- 87- Chappex, T., & Scrivener, K. L. (2012). The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1645-1649.
- 88- Chappex, T., & Scrivener, K. L. (2013). The effect of aluminum in solution on the dissolution of amorphous silica and its relation to cementitious systems. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(2), 592-597.

- 89- Hong, S. Y., & Glasser, F. P. (2002). Alkali sorption by CSH and CASH gels: Part II. Role of alumina. *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1101-1111.
- 90- Moraes Neves, J. M. (2016). The Alkali-Silica Reaction in Alkali-Activated Fly Ash Concrete.
- 91- Puertas, F., Palacios, M., Gil-Maroto, A., & Vázquez, T. (2009). Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type. *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 277-284.
- 92- Gifford, P. M., & Gillott, J. E. (1996). Alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete. *Cement and concrete research*, 26(1), 21-26.
- 93- Yang, C., & Pu, X. (1999). Research on alkali-aggregate reaction of alkali-clinker-slag cement concrete. *J Chongqing Jianzhu Univ*, 21, 14-19.
- 94- Yang, C., Pu, X., & Wu, F. (1999). Research on alkali aggregate reaction expansion of alkali-slag mortar. *J*, 1304, 651-657.
- 95- Talling, B., & Brandstetr, J. (1989). Present state and future of alkali-activated slag concretes. *Special Publication*, 114, 1519-1546.
- 96- Wang, S. D., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and concrete research*, 24(6), 1033-1043.
- 97- García-Lodeiro, I., Palomo, A. Y., & Fernández-Jiménez, A. (2007). Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 175-183.
- 98- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2001). Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 331-334.
- 99- Shi, Z., Shi, C., Zhao, R., & Wan, S. (2015). Comparison of alkali-silica reactions in alkali-activated slag and Portland cement mortars. *Materials and Structures*, 48(3), 743-751.
- 100- Fernández-Jiménez, A., & Puertas, F. (2002). The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and concrete research*, 32(7), 1019-1024.
- 101- You-zhi, C., Xin-cheng, P., Chang-hui, Y., & Qing-jun, D. (2002). Alkali aggregate reaction in alkali slag cement mortars. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 17(3), 60-62.
- 102- Shi, Z., Shi, C., Wan, S., & Zhang, Z. (2018). Effects of alkali dosage and silicate modulus on alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, 111, 104-115.
- 103- Li, Z., Thomas, R. J., Lazama, D., & Peethamparan, S. (2016). Alkali silica reaction (ASR) in cement free alkali activated sustainable concrete.
- 104- Shi, Z., Shi, C., Wan, S., & Ou, Z. (2017). Effect of alkali dosage on alkali-silica reaction in sodium hydroxide activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 143, 16-23
- 105- Al-Otaibi, S. (2008). Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2059-2067.

- 106- Kupwade-Patil, K., & Allouche, E. N. (2013). Impact of alkali silica reaction on fly ash-based geopolymer concrete. *Journal of materials in Civil Engineering*, 25(1), 131-139.
- 107- Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, conservation and recycling*, 52(2), 234-247.
- 108- Thomas, M. D. A., & Innis, F. A. (1998). Effect of slag on expansion due to alkali aggregate reaction in concrete. *Materials Journal*, 95(6), 716-724.
- 109- Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S., & Abu-Tair, A. I. (2003). The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), 123-144.
- 110- Shi, C., Shi, Z., Hu, X., Zhao, R., & Chong, L. (2015). A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with alkali-reactive aggregates. *Materials and Structures*, 48(3), 621-628
- 111- Touma, W. E., Fowler, D. W., Carrasquillo, R. L., Folliard, K. J., & Nelson, N. R. (2001). Characterizing alkali-silica reactivity of aggregates using ASTM C 1293, ASTM C 1260, and their modifications. *Transportation research record*, 1757(1), 157-165.
- 112- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (Eds.). (2013). *Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM (Vol. 13)*. Springer Science & Business Media.
- 113- Huang, G., Ji, Y., Zhang, L., Li, J., & Hou, Z. (2018). The influence of curing methods on the strength of MSWI bottom ash-based alkali-activated mortars: The role of leaching of OH⁻ and free alkali. *Construction and Building Materials*, 186, 978-985.
- 114- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and concrete research*, 35(6), 1224-1232.
- 115- Xie, Z., Xiang, W., & Xi, Y. (2003). ASR potentials of glass aggregates in water-glass activated fly ash and portland cement mortars. *Journal of materials in civil engineering*, 15(1), 67-74.
- 116- Mahanama, D., De Silva, P., Kim, T., Castel, A., & Khan, M. S. H. (2019). Evaluating Effect of GGBFS in Alkali-Silica Reaction in Geopolymer Mortar with Accelerated Mortar Bar Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), 04019167.
- 117- Ai Qin, W., Chengzhi, Z., Mingshu, T., & Ningsheng, Z. (1999). ASR in mortar bars containing silica glass in combination with high alkali and high fly ash contents. *Cement and Concrete Composites*, 21(5-6), 375-381.
- 118- Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I., & Palomo, A. (2007). Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3055-3065.
- 119- Thomas, M. (2011). The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. *Cement and concrete research*, 41(12), 1224-1231

- 120- Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Diederich, P., & Petit, L. (2010). Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 508-516.
- 121- Kim, T., & Olek, J. (2015). Modeling of early age loss of lithium ions from pore solution of cementitious systems treated with lithium nitrate. *Cement and Concrete Research*, 67, 204-214.
- 122- Leemann, A., Bernard, L., Alahrache, S., & Winnefeld, F. (2015). ASR prevention—Effect of aluminum and lithium ions on the reaction products. *Cement and Concrete Research*, 76, 192-201.
- 123- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (Eds.). (2013). Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
- 124- Li, C., Thomas, M. D., & Ideker, J. H. (2018). A mechanistic study on mitigation of alkali-silica reaction by fine lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, 104, 13-24
- 125- ASTM C150 / C150M-20, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- 126- Giebson, C., Seyfarth, K., & Stark, J. (2010). Influence of acetate and formate-based deicers on ASR in airfield concrete pavements. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 537-545.
- 127- Williamson, T., & Juenger, M. C. (2016). The role of activating solution concentration on alkali-silica reaction in alkali-activated fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 83, 124-130.
- 128- Shi, Z., Shi, C., Zhang, J., Wan, S., Zhang, Z., & Ou, Z. (2018). Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 108, 10-19.
- 129- McCoy, W. J., & Caldwell, A. G. (1951, May). New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. In *Journal Proceedings* (Vol. 47, No. 5, pp. 693-706).
- 130- Collins, C. L., Ideker, J. H., Willis, G. S., & Kurtis, K. E. (2004). Examination of the effects of LiOH, LiCl, and LiNO₃ on alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1403-1415.
- 131- Feng, X., Thomas, M. D. A., Bremner, T. W., Folliard, K. J., & Fournier, B. (2010). Summary of research on the effect of LiNO₃ on alkali-silica reaction in new concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 636-642.
- 132- Feng, X., Thomas, M. D. A., Bremner, T. W., Balcom, B. J., & Folliard, K. J. (2005). Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1789-1796.
- 133- Shafaatian, S. (2012). Innovative methods to mitigate alkali-silica reaction in concrete materials containing recycled glass aggregates.
- 134- Hay, R., & Ostertag, C. P. (2019). On utilization and mechanisms of waste aluminium in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 212, 864-879.
- 135- Bérubé, M. A., Chouinard, D., Pigeon, M., Frenette, J., Boisvert, L., & Rivest, M. (2002). Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in plain

- and air-entrained laboratory concretes exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and salt water. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(2), 289-300.
- 136- Jensen, A. D., Chatterji, S., Christensen, P., & Thaulow, N. (1984). Studies of alkali-silica reaction—part II effect of air-entrainment on expansion. *Cement and Concrete Research*, 14(3), 311-314
- 137- Fournier, B., Bérubé, M. A., Folliard, K. J., & Thomas, M. (2010). Report on the diagnosis, prognosis, and mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in transportation structures (No. FHWA-HIF-09-004). United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.
- 138- Moraes Neves, J. M. (2016). The Alkali-Silica Reaction in Alkali-Activated Fly Ash Concrete.
- 139- Dunant, C. F., & Scrivener, K. L. (2016). Physically based models to study the alkali-silica reaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 169(3), 136-144.
- 140- Munir, M. J., Abbas, S., Qazi, A. U., Nehdi, M. L., & Kazmi, S. M. S. (2018). Role of test method in detection of alkali-silica reactivity of concrete aggregates. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 171(5), 203-221.
- 141- Islam, M. S., & Ghafoori, N. (2015). Relation of ASR-induced expansion and compressive strength of concrete. *Materials and Structures*, 48(12), 4055-4066.
- 142- Islam, M. S., & Ghafoori, N. (2018). A new approach to evaluate alkali-silica reactivity using loss in concrete stiffness. *Construction and Building Materials*, 167, 578-586.
- 143- Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J. M., & Batic, O. R. (2008). Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 993-1004.
- 144- Mohammadi, A., Ghiasvand, E., & Nili, M. (2020). Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. *Construction and Building materials*, 258, 119567.
- 145- Barbosa, R. A., Hansen, S. G., Hansen, K. K., Hoang, L. C., & Grelk, B. (2018). Influence of alkali-silica reaction and crack orientation on the uniaxial compressive strength of concrete cores from slab bridges. *Construction and Building Materials*, 176, 440-451.
- 146- Ben Haha, M. (2006). Mechanical effects of alkali silica reaction in concrete studied by SEM-image analysis (No. THESIS). EPFL.
- 147- Morenon, P., Multon, S., Sellier, A., Grimal, E., Hamon, F., & Bourdarot, E. (2017). Impact of stresses and restraints on ASR expansion. *Construction and Building Materials*, 140, 58-74.
- 148- Smaoui, N., Bérubé, M. A., Fournier, B., Bissonnette, B., & Durand, B. (2005). Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete. *Cement and concrete research*, 35(2), 203-212.
- 149- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Bastien, J., & Mitchell, D. (2016). Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete

- infrastructure affected by alkali-silica reaction. *Construction and Building Materials*, 125, 1178-1188.
- 150- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., & Bastien, J. (2015). Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. *Construction and Building Materials*, 77, 20-32.
- 151- ASTM C289-94, Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, www.astm.org
- 152- ASTM C227-10, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method) (Withdrawn 2018), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org
- 153- ASTM C441 / C441M-17, Standard Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
- 154- ASTM C1260-14, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org



Bu-Ali Sina University
Graduate Studies Thesis\Dissertation Information

Title:

Evaluation of Cement Base Products Containing Alkali-Activated Slag Against the Alkali-Silica Reaction of Aggregates Using an Approach

Author: Hossein Mohammadi

Student Number: 9713979010

Supervisor(s): Dr. Ebrahim Ghiasvand

Faculty: Engineering

Department: Civil Engineering

Subject: Civil Engineering

Field: Construction management

Degree: Master of Science

Approval Date: 11/18/2019

Defence Date: 02/04/2022

Number of Pages: 113

Abstract:

Due to the production process of Portland cement, considerable amount of carbon dioxide is produced and will cause environmental contamination. Alkali-activated mixtures are used as an alternative to conventional Portland cement-based mixtures because of their superiority in cases such as better mechanical properties and less environmental pollution. But alkaline activators commonly used for activation may led to damage due to the alkali silica reaction when the activated systems with the alkali contains reactive aggregates and limiting the commercial use. Today, a variety of methods and standards such as ASTM C1260 and ASTM C1293 are used to identify reactive materials and measures to limit the risk of damage due to this reaction in the construction of concrete structures and elements. Current procedures mostly try to investigate the reactivity of aggregates by measuring the length change of mortar and concrete samples. To make the alkali-activated systems in this study, the Ground granulated blast furnace slag precursor was used as main material and to activate it, a combination of sodium hydroxide solution and sodium silicate was used. In this study, the performance of alkali-activated slag against alkali silica reaction was investigated. For this purpose, the prepared mixtures contain reactive aggregates by applying intensified conditions (using high temperature and high alkalinity) to reduce the alkaline reaction time of silica, in addition to measuring the change in length by evaluating the properties. Mechanical and durability were evaluated. The results illustrate alkali-activated slag systems were absolutely superior to Ordinary Portland cement systems in all experiments. In other words, although the alkalinity of activated slag systems with alkali was very high, but it performs much better against the alkali silica reaction than Ordinary Portland cement systems. Also, among the mechanical properties, tensile, flexural and compressive strength, respectively, had the highest impact and solidarity with alkali silica reaction. In addition, the results of the electrical resistance test produced by expansion in the concrete mixtures had a good correlation

Key Words: Alkali-activated concrete, Ground granulated blast furnace slag, Alkali-silica Reaction (ASR), length change, mechanical properties, electrical resistivity



دانشگاه بو علی سینا

Bu-Ali Sina University

Faculty of Engineering
Department of Civil Engineering

**Thesis Submitted in partial fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of
Civil Engineering- construction management**

Title:

**Evaluation of Cement Base Products Containing Alkali-Activated Slag
Against the Alkali-Silica Reaction of Aggregates Using an Approach**

Supervisor:

Ebrahim Ghasvand (Ph. D)

By:

Hossein Mohammadi

Feb, 04, 2022